



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME PELEPASAN
BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT PADA SISTEM
KELISTRIKAN NEW ISLAND TURSINA PT. PUPUK KALIMANTAN
TIMUR**

Aidatul Khoiriatis
NRP 2213100019

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**THE TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING
MECHANISM AS THE EFFECT OF GENERATOR INCREMENT AT
NEW ISLAND TURSINA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR
ELECTRICAL SYSTEM**

Aidatul Khoiriaty
NRP 2213100019

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisa Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Akibat Penambahan Pembangkit pada Sistem Kelistrikan New Island Tursina PT. Pupuk Kalimantan Timur”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2016

Aidatul Khoiriatis
NRP 2213100019

**ANALISA KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME
PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN
PEMBANGKIT PADA SISTEM KELISTRIKAN
NEW ISLAND TURSINA
PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

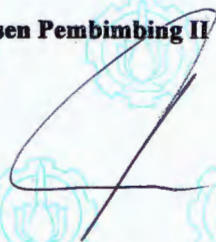
Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

NIP 196603181990101001

Dosen Pembimbing II



Ir. Arif Musthofa, MT.

NIP 196903181990101001



ALISA KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT PADA SISTEM KELISTRIKAN NEW ISLAND TURSINA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR

Nama : Aidatul Khoiratis
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRAK

Guna menunjang kontinuitas aliran daya pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur akibat adanya penambahan pabrik baru di area Tursina, maka diperlukan penambahan 5 unit pembangkit baru. Pada awalnya, sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur beroperasi dengan menggunakan 6 unit pembangkit, sehingga setelah ditambahkan sejumlah pembangkit baru pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur menjadi 11 unit pembangkit. Akibat adanya penambahan pabrik baru tersebut, belum dilakukan analisis mengenai kestabilan transien pada keseluruhan sistem secara mendalam sehingga perlu dilakukan studi stabilitas transien. Tujuan dari studi stabilitas transien adalah untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan transien. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis kestabilan transien yang disebabkan oleh dua jenis gangguan, yaitu generator lepas (*outage*) dan hubung singkat (*short circuit*). Selanjutnya, akan dilakukan perancangan pelepasan beban (*load shedding*) agar sistem dapat mempertahankan kestabilannya sehingga kontinuitas aliran daya pada sistem kelistrikan tetap terjaga. Berdasarkan hasil simulasi, menunjukkan bahwa pada kasus lepasnya satu hingga dua generator tidak perlu dilakukan *load shedding*. Sementara itu, untuk kasus lepasnya satu generator ketika dua generator mati sebelum sistem berjalan diperlukan *load shedding*. Mekanisme *load shedding* yang diterapkan pada kasus ini menggunakan mekanisme *load shedding* status. Pada kasus selanjutnya, yaitu kasus hubung singkat, sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya meskipun tegangan sistem mengalami penurunan yang cukup rendah pada beberapa bus.

Kata Kunci : Gangguan transien, kestabilan transien, pelepasan beban.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

THE TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING MECHANISM AS THE EFFECT OF GENERATOR INCREMENT AT NEW ISLAND TURSINA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR ELECTRICAL SYSTEM

Name : Aidatul Khoiratis
1st Advisor : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
2st Advisor : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRACT

In order to support the continuity of established electrical systems in PT. Pupuk Kalimantan Timur caused by adding a new plant at Tursina area, so it is necessary to install 5 new generator units. Initially, there are 6 operated generator units in PT. Pupuk Kalimantan Timur, after the installation of new generator units, total generator units in PT. Pupuk Kalimantan Timur become 11 generator units. Because of the new plant installation, studies of the transient stability have not been deeply analyzed, thereby studying transient stability is necessary. The purpose of studying transient stability is to determine the reliability of the system during transient disturbance. In this final project, will be analyses about transient stability caused by generator outage and short circuit disturbances. Then, there will be load shedding design, so the system can maintain the stability and power flow continuity. Based on simulation, show that one until two generator units outage do not need load shedding. Whereas, in case one generator outage while two generator units off need load shedding. Load shedding mechanism in this case uses load shedding status. For the next case, short circuit, the system can maintain stability of the system although the system voltage decreases in several buses.

Key Word : Transient disturbances, transient stability, load shedding.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

ANALISA KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT PADA SISTEM KELISTRIKAN NEW ISLAND TURSINA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR

Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi tahap sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain :

1. Segenap keluarga tercinta, Mokhammad Zainukhi, Siti Masuda, dan Rafli Dwi Zaidan yang selalu memberi dukungan, semangat serta doa yang tiada henti untuk keberhasilan penulis.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Ir. Arif Musthofa, MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran dan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Seluruh rekan LIPIST B-204 atas bantuan, dukungan, kebersamaan dan kerja samanya selama ini.
4. Seluruh rekan Memet, Bagus, Kezia, Kiki, Dwi, Sukma, Ningrum, Nisa, Alfian yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama ini.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, sahabat-sahabat e-53 (2013), para dosen, karyawan, serta seluruh rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan serta kerjasamanya sepanjang masa perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir ini.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik, saran serta

koreksi yang membangun dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang.

Surabaya, Desember 2016

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sitematika Penulisan	5
1.6 Relevansi	5

BAB 2

KESTABILAN SISTEM TENAGA

2.1 Kestabilan Sistem	7
2.2 Klasifikasi Kestabilan	8
2.2.1 Kestabilan Frekuensi	8
2.2.2 Kestabilan Tegangan	9
2.2.3 Kestabilan Sudut Rotor	10
2.3 Kestabilan Transien	10
2.3.1 Hubung Singkat	11
2.3.2 <i>Starting</i> pada Motor	12
2.3.3 Penambahan Beban secara Tiba -tiba	12
2.3.4 Hubungan Daya dengan Sudut Rotor	14
2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	17
2.5 Pengaturan Frekuensi	21
2.5.1 <i>Mode Droop</i>	22
2.5.2 <i>Mode Isochorus</i>	23
2.6 Pelepasan Beban	23
2.6.1 Pelepasan Beban Secara Manual	25
2.6.2 Pelepasan Beban secara Otomatis	25
2.6.2.1 Pelepasan Beban secara Otomatis Menggunakan <i>Underfrequency Relay</i> (81U)	25

2.6.2.1 Pelepasan Beban secara Otomatis Menggunakan Lockout Relay (86).....	26
2.7 Standar yang Berkaitan dengan Analisa Kestabilan Transien	26
2.7.1 Standar Frekuensi	26
2.7.1 Standar Tegangan	28

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PADA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Pupuk Kalimantan Timur	29
3.2 Data Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.....	31
3.1.1 Sistem Pembangkitan PT. Pupuk Kalimantan Timur	31
3.1.2 Sistem Distribusi PT. Pupuk Kalimantan Timur	32

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan.....	35
4.2 Studi Kasus Kestabilan Transien	35
4.2.1 <i>Generator Outage</i>	37
4.2.2 <i>Short Circuit</i>	37
4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	38
4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien <i>Generator Outage</i>	38
4.3.1.1 Studi Kasus GE-K2 Lepas dari Sistem ($t=2s$)	38
4.3.1.2 Studi Kasus New Gen 1 Lepas dari Sistem ($t=2s$).	41
4.3.1.3 Studi Kasus New Gen 1 dan GEN P K-4 Lepas dari Sistem ($t=2s$)	44
4.3.1.4 Studi Kasus STG-K5 dan STG2 K-5 Lepas dari Sistem ($t=2s$)	46
4.3.1.5 Studi Kasus GE-K2 Mati, Alsthom K3 Mati dan New Gen 1 Lepas dari Sistem ($t=2s$).....	49
4.3.1.6 Studi Kasus GE-K2 Mati, Alsthom K3 Mati dan New Gen 1 Lepas dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i>	52
4.3.1.7 Studi Kasus GE-K2 Mati, New Gen 1 Mati dan New Gen 2 Lepas dari Sistem ($t=2s$)	54
4.3.1.8 Studi Kasus GE-K2 Mati, New Gen 1 Mati dan New Gen 2 trip dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i>	57

4.3.1.9	Studi Kasus New Gen 1 Mati, New Gen 2 Mati dan GEN P K-4 Lepas dari Sistem ($t=2s$)	60
4.3.1.10	Studi Kasus New Gen 1 Mati, New Gen 2 Mati dan GEN P K-4 Lepas dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i>	62
4.3.2.	Simulasi Kestabilan Transien <i>Short Circuit</i>	65
4.3.2.1	Studi Kasus <i>Short Circuit</i> di Bus KALTIM 1A 6.6 kV ($t=2 s$)	65
4.3.2.2	Studi Kasus <i>Short Circuit</i> di Bus 52-SG-411 6.9 kV ($t=2 s$).....	68
4.3.2.3	Studi Kasus <i>Short Circuit</i> di Bus BUS1 11 kV ($t=2 s$).....	70
4.3.2.4	Studi Kasus <i>Short Circuit</i> di Bus TU-SG-02 20 kV ($t=2 s$).....	73
4.3.2.5	Studi Kasus <i>Short Circuit</i> di Bus RING 33 33 kV ($t=2 s$).....	76

BAB 5

PENUTUP

5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran	812

DAFTAR PUSTAKA	83
----------------------	----

BIOGRAFI PENULIS	85
------------------------	----

LAMPIRAN.....	87
---------------	----

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Flow chart</i> metodologi pelaksanaan studi	4
Gambar 2.1	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga	8
Gambar 2.2	Respon sudut rotor terhadap gangguan transien	13
Gambar 2.3	Diagram reaktansi sistem dua mesin	14
Gambar 2.4	Diagram fasor sistem dua mesin	15
Gambar 2.5	Respon generator saat terjadi gangguan	17
Gambar 2.6	Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektrik (a) Generator (b) Motor	18
Gambar 2.7	Blok diagram kerja <i>speed governor</i>	22
Gambar 2.8	Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban	24
Gambar 2.9	Standar frekuensi untuk turbin uap(IEEE Std C37.106-2003)	27
Gambar 2.10	<i>Voltage Magnitude Event</i> berdasarkan standar IEEE 1195-1995	28
Gambar 3.1	Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sebelum penambahan beban	29
Gambar 3.2	Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur setelah penambahan beban	30
Gambar 3.3	New System	30
Gambar 4.1	Respon frekuensi saat GE-K2 lepas dari sistem	39
Gambar 4.2	Respon tegangan saat GE-K2	39
Gambar 4.3	Respon sudut rotor saat GE-K2 lepas dari sistem	40
Gambar 4.4	Respon frekuensi saat New Gen 1 lepas dari sistem	41
Gambar 4.5	Respon tegangan saat New Gen 1 lepas dari sistem	42
Gambar 4.6	Respon sudut rotor saat New Gen 1 lepas dari sistem ..	43
Gambar 4.7	Respon frekuensi saat New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem	44
Gambar 4.8	Respon tegangan saat New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem	45
Gambar 4.9	Respon sudut rotor saat New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem	46
Gambar 4.10	Respon frekuensi saat STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem	47
Gambar 4.11	Respon tegangan saat STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem	47

Gambar 4.12	Respon sudut rotor saat STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem.....	48
Gambar 4.13	Respon frekuensi saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem.....	49
Gambar 4.14	Respon tegangan saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem.....	50
Gambar 4.15	Respon sudut rotor saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem.....	51
Gambar 4.16	Respon frekuensi saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	52
Gambar 4.17	Respon tegangan saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	53
Gambar 4.18	Respon sudut rotor saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	54
Gambar 4.19	Respon frekuensi saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem	55
Gambar 4.20	Respon tegangan saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem	56
Gambar 4.21	Respon Sudut rotor saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem.....	57
Gambar 4.22	Respon frekuensi saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	57
Gambar 4.23	Respon tegangan saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	58
Gambar 4.24	Respon sudut rotor saat Generator GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	59
Gambar 4.25	Respon frekuensi saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem	60
Gambar 4.26	Respon tegangan saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem	61
Gambar 4.27	Respon sudut rotor saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem	61
Gambar 4.28	Respon frekuensi saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	62

Gambar 4.29	Respon tegangan saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	63
Gambar 4.30	Respon sudut rotor saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem dengan <i>load shedding</i>	64
Gambar 4.31	Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus KALTIM IA	65
Gambar 4.32	Respon tegangansaat terjadi hubung singkat di bus KALTIM IA	66
Gambar 4.33	Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus KALTIM IA	67
Gambar 4.34	Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411	68
Gambar 4.35	Respon tegangan saat terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411	69
Gambar 4.36	Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411	70
Gambar 4.37	Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus BUS1	71
Gambar 4.38	Respon tegangansaat terjadi hubung singkat di bus BUS1	72
Gambar 4.39	Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus BUS1	73
Gambar 4.40	Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02	74
Gambar 4.41	Respon tegangansaat terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02	75
Gambar 4.42	Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02.....	76
Gambar 4.43	Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus RING 33.....	77
Gambar 4.44	Respon tegangan saat terjadi hubung singkat di bus RING 33.....	78
Gambar 4.45	Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus RING 33.....	79

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jumlah total pembangkitan, pembebanan, dan <i>demand</i>	31
Tabel 3.2	Data pembangkit	31
Tabel 3.3	<i>Setting exciter</i>	32
Tabel 3.4	Data transformator distribusi di PT. Pupuk Kalimantan Timur.....	33
Tabel 4. 1	Studi kasus kestabilan transien.....	36

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Stabilitas pada sistem tenaga listrik merupakan hal yang penting untuk menjamin kontinuitas dan keandalan operasi dari suatu sistem tenaga listrik, terlebih untuk sistem kelistrikan skala besar yang terdiri lebih dari dua generator dan menyuplai beban yang banyak dalam waktu bersamaan. Kerugian besar dapat terjadi apabila kontinuitas daya tidak terpenuhi[1]. Dalam operasi yang stabil pada sistem tenaga listrik, akan terjadi keseimbangan antara daya *input* mekanik pada *prime over* dengan daya *output* listrik yang disalurkan ke beban[2]. Pada kondisi ini, semua generator pada sistem akan beroperasi pada kecepatan sinkron. Daya *output* listrik sangat dipengaruhi oleh kenaikan dan penurunan beban, dimana saat hal tersebut terjadi maka *prime over* harus mampu menyesuaikan masukan daya *input* mekanik. Apabila *prime over* tidak mampu menyesuaikan dengan kondisi beban, hal ini akan mengakibatkan ketidakstabilan pada sistem[3].

Masalah kestabilan transien berkaitan dengan gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba dan dalam waktu yang singkat (*short-term*) seperti gangguan hubung singkat (*short circuit*), pemutusan saluran secara tiba-tiba menggunakan CB (*Circuit Breaker*) akibat dari adanya gangguan hubung singkat, serta pemindahan (*maneuver*) beban secara tiba-tiba[4]. Apabila gangguan ini terjadi dan tidak segera dihilangkan, maka hal ini akan mengakibatkan terjadinya percepatan atau perlambatan sudut rotor, apabila sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya akan mengakibatkan generator kehilangan sinkronisasi dengan sistem[4].

Terdapat berbagai macam kasus berkaitan dengan gangguan yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik. Namun, pada kasus tertentu dibutuhkan suatu rancangan mekanisme pelepasan beban saat terjadi gangguan yang berkaitan dengan kestabilan transien. Tujuannya adalah agar sistem kembali stabil dan gangguan yang terjadi tidak menyebabkan rusaknya peralatan-peralatan pada sistem.

Gangguan transien dapat mempengaruhi stabilitas dari suatu sistem tenaga listrik khususnya pada industri-industri besar, seperti PT. Pupuk Kalimantan Timur. PT. Pupuk Kalimantan Timur mengalami perkembangan pada sistem kelistrikan interkoneksinya. Pada PT. Pupuk Kalimantan Timur akan dilakukan penambahan pembangkit dan penambahan beban di area New Island Tursina. Sistem integrasi ini

direncanakan untuk menyuplai kebutuhan energi listrik pabrik baru dan akan dihubungkan dengan sistem integrasi eksisting melalui Bus Tursina. Oleh karena itu, dibutuhkan studi stabilitas transien untuk mengetahui kestabilan sistem saat terjadi gangguan transien. Maka, pada tugas akhir ini analisis yang dilakukan meliputi kestabilan frekuensi, tegangan, dan sudut rotor. Selain itu, analisis mekanisme pelepasan beban juga dilakukan untuk mengatasi gangguan transien yang terjadi. Sedangkan perubahan yang akan terjadi pada sistem meliputi generator lepas dan hubung singkat.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini meliputi:

1. Mengetahui pola operasi sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kalimantan Timur setelah penambahan pembangkit dan penambahan beban pada area New Island Tursina.
2. Melakukan simulasi analisa kestabilan transien respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.
3. Mendapatkan pola mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) yang handal sehingga mampu mengatasi gangguan transien yang mungkin terjadi di PT. Pupuk Kalimantan Timur.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah:

1. Melakukan pemodelan, simulasi, dan analisis pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur akibat penambahan pembangkit pada area New Island Tursina.
2. Melakukan studi analisis kestabilan transien untuk mendapatkan rekomendasi yang diperlukan sehingga dicapai keandalan serta stabilitas yang layak dan mampu mengatasi gangguan-gangguan terkait yang mungkin terjadi di PT. Pupuk Kalimantan Timur.
3. Mendapatkan skema *load shedding* yang handal untuk menjamin kemampuan sistem kembali pulih akibat adanya gangguan yang dapat mengganggu kestabilan sistem.

1.4 Metodologi

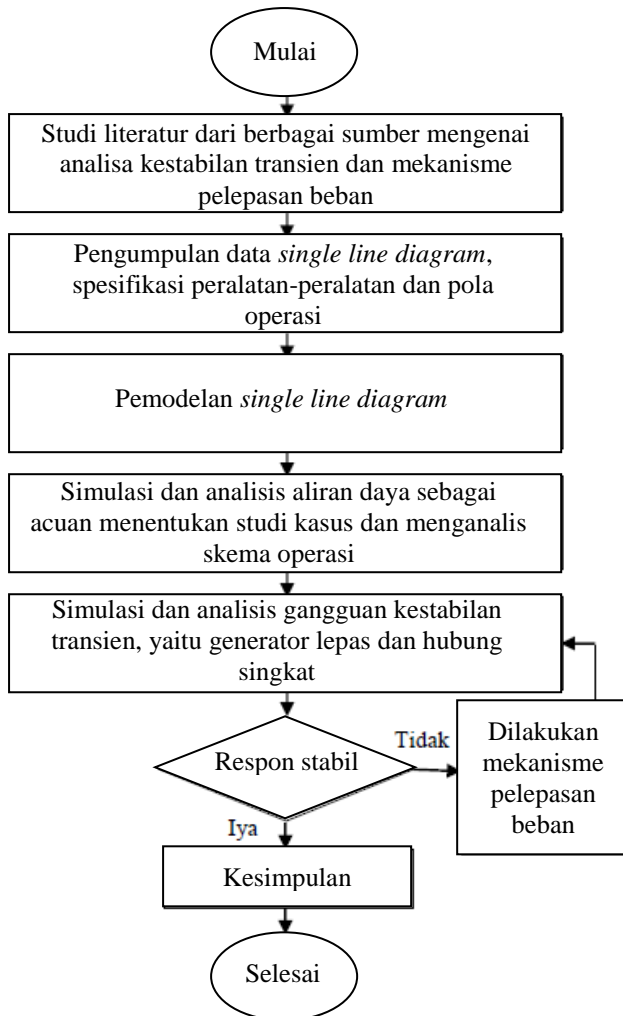
Dalam melakukan proses penelitian, dilakukan tahapan pengerjaan sebagai berikut:

1. Studi literatur

Pada tahap ini akan dicari literatur terbaru yang berkaitan dengan penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya. Selanjutnya, dilakukan kajian terhadap penelitian sebelumnya untuk mengetahui bagian-bagian yang dapat diadopsi dan dikembangkan pada penelitian ini.

2. Pengumpulan data
Melakukan pengumpulan data-data penunjang yang diperlukan. Dalam tugas akhir ini data yang diperlukan, diantaranya *single line diagram* sistem kelistrikan, data peralatan dan beban pada PT. Pupuk Kalimantan Timur.
3. Pemodelan sistem
Melakukan pengolahan data dan pemodelan sistem dalam bentuk *single line diagram* menggunakan software ETAP 21.6.0. Pemodelan ini dilakukan agar dapat melakukan analisis aliran daya dan kestabilan transien.
4. Simulasi
Melakukan simulasi terhadap *single line diagram* yang telah dibuat pada tahap sebelumnya. Simulasi yang dilakukan meliputi simulasi aliran daya, selanjutnya dilakukan simulasi kestabilan transien.
5. Analisa
Dari hasil simulasi, selanjutnya dianalisis respon dari frekuensi, tegangan, dan sudut rotor apakah sudah sesuai dengan standar yang ada. Apabila respon sistem yang didapat tidak sesuai dengan standar yang ada, maka akan dirancang mekanisme pelepasan beban yang sesuai dengan standar.
6. Kesimpulan
Setelah melakukan analisis hasil simulasi, maka ditarik suatu kesimpulan berdasarkan kondisi-kondisi yang ada. Kesimpulan ini juga diakhiri dengan saran atau rekomendasi terhadap penelitian selanjutnya.

Gambaran sederhana mengenai *flow chart* dari metodologi yang akan dilakukan dapat dilihat pada gambar 1.1 berikut.



Gambar 1.1 *Flow chart* metodologi pelaksanaan studi

1.5 Sitematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dengan uraian sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

Bab II : Dasar Teori

Bab ini membahas teori penunjang kestabilan transien dan pelepasan beban

Bab III : Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur

Bab ini membahas profil kelistrikan, serta pembebanan pada PT. Pupuk Kalimantan Timur setelah penambahan beban dan penambahan pembangkit

Bab IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas tentang hasil simulasi yang dilakukan, meliputi generator lepas dan hubung singkat yang di analisa pada generator dan bus, evaluasi *load shedding* eksisting dan juga desain *load shedding* yang baru.

Bab V : Kesimpulan

Bab ini membahas tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai acuan dasar pada saat mengoperasikan sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimnatan Timur yang baru agar sistem berjalan aman dan stabil.
2. Digunakan sebagai acuan dalam melakukan mekanisme *load shedding* terhadap sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimnatan Timur yang baru.
3. Dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan di industri.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 2

KESTABILAN SISTEM TENAGA

2.1 Kestabilan Sistem

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk beroperasi normal saat terjadi gangguan maupun setelah terjadi gangguan pada sistem tenaga tersebut[3]. Beban sistem tenaga listrik merupakan beban dinamis, dimana setiap detik dapat berubah, sehingga aliran daya listrik harus disesuaikan dengan kebutuhan beban setiap waktunya. Dalam keadaan seimbang, daya mekanik dan daya elektrik bergerak secara bersamaan dengan kecepatan konstan. Apabila terjadi penurunan atau kenaikan beban yang tidak terduga maka dapat mengakibatkan sistem menjadi tidak seimbang. Hal ini, berdampak pada adanya perbedaan daya elektrik dan mekanik dari generator. Kelebihan daya elektrik menyebabkan perlambatan putaran rotor generator karena generator semakin terbebani. Sebaliknya, kelebihan daya mekanik menyebabkan percepatan putaran rotor karena beban yang ditanggung generator semakin ringan. Bila gangguan tersebut tidak segera dihilangkan, maka perlambatan maupun percepatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis kestabilan transien agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem.

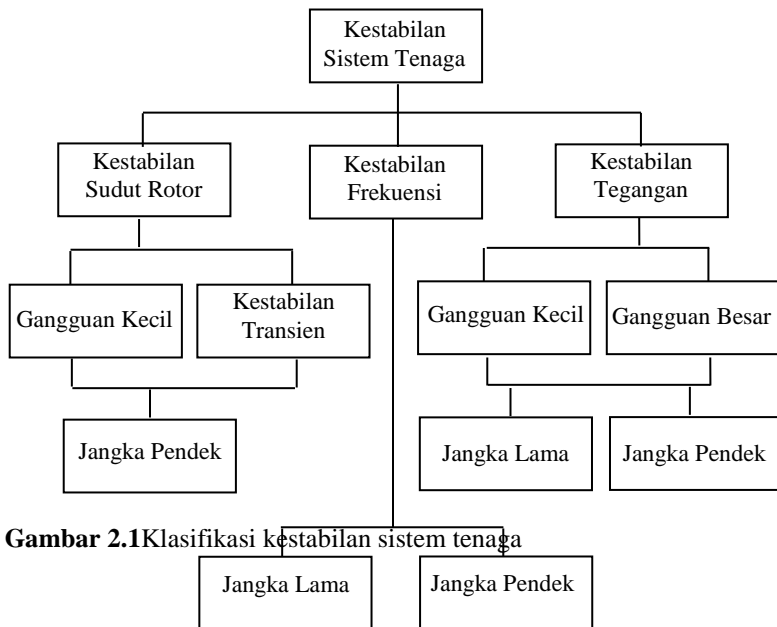
Setelah terjadi gangguan, upaya mengembalikan sistem pada kondisi operasi sinkron perlu dilakukan. Upaya tersebut dikenal dengan istilah periode transien. Karakteristik utama stabilitas adalah bagaimana mesin-mesin dapat mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien. Jika respon sistem mengalami osilasi saat terjadi gangguan dan kemudian dapat teredam dengan sendirinya, maka sistem dapat dikatakan stabil. Jika osilasi terjadi secara terus menerus hingga periode yang lama maka sistem dikatakan tidak stabil[5]. Jika osilasi sistem mampu teredam berarti sistem itu mempunyai kekuatan dalam mengurangi osilasi dan hal ini yang sangat diperlukan bagi sistem tenaga. Terdapat dua gangguan yang dapat mempengaruhi kestabilan pada sistem tenaga listrik yaitu gangguan besar dan gangguan kecil. Gangguan besar yaitu lepasnya generator dan terjadinya hubungan singkat. Sedangkan gangguan kecil berupa perubahan beban yang berlangsung terus menerus.

2.2 Klasifikasi Kestabilan

Beberapa faktor dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Berdasarkan faktor-faktor tersebut, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga [6], diantaranya:

1. Kestabilan frekuensi
2. Kestabilan tegangan
3. Kestabilan sudut rotor

Pengelompokan yang ditunjukkan pada gambar 2.1 ini dilakukan dengan tujuan untuk mempermudah analisa kestabilan yang akan dilakukan.



Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga

2.2.1 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi diartikan sebagai kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi agar tetap stabil ketika terjadi gangguan pada sistem. Gangguan yang dimaksud merupakan gangguan besar yang terjadi akibat ketidakseimbangan antara aliran daya sistem dan beban.

Titik keseimbangan (*equilibrium point*) antara aliran daya sistem dan beban harus dipertahankan. Hal ini, untuk menghindari hilangnya sinkronisasi pada sistem.

Klasifikasi kestabilan frekuensi dibagi menjadi dua, yaitu kestabilan frekuensi jangka panjang dan kestabilan frekuensi jangka pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* yang tidak bekerja ketika terjadi gangguan, gangguan ini terjadi dalam rentang waktu puluhan detik hingga beberapa menit. Sementara itu, kestabilan frekuensi jangka pendek disebabkan karena terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu memenuhi kebutuhan daya pada sistem sehingga frekuensi menurun secara tiba-tiba dan menyebabkan sistem mati total dalam durasi beberapa detik[6].

2.2.2 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan diartikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan tegangan pada semua bus dari sistem setelah mengalami gangguan. Pada saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik maka tegangan dapat mengalami penurunan atau kenaikan. Hal ini, tergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan kesetimbangan antara *supply* daya pembangkit dan kebutuhan beban.

Gangguan yang biasanya terjadi adalah lepasnya beban secara tiba-tiba ataupun hilangnya sinkron dari salah satu pembangkit sehingga tegangan menjadi turun secara drastis. Secara umum, gangguan kestabilan tegangan dibedakan menjadi dua yaitu kestabilan tegangan jangka panjang dan kestabilan tegangan jangka pendek[6].

Gangguan kestabilan tegangan jangka panjang dapat mengakibatkan hal-hal berikut:

1. Tegangan mengalami *undervoltage*, yaitu tegangan dibawah 90% dari tegangan normal.
2. Tegangan mengalami *overvoltage*, yaitu tegangan diatas 110% dari tegangan normal.

Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek dapat mengakibatkan hal-hal berikut:

1. *Momentary interruption*, mengakibatkan tegangan menjadi sangat rendah ($<0,1\text{pu}$) pada satu fasa atau lebih dari satu fasa konduktor selama 0,5cycle dan 3s.
2. *Volage sag*, merupakan penurunan magnitude tegangan selama 0,5cycle sampai 1 menit.
3. *Swell*, merupakan kenaikan tegangan lebih dari 1,1 pu selama 0,5 cycle sampai 1 menit.

2.2.3 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor diartikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kemampuan mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada mesin-mesin tersebut. Akibat dari ketidakstabilan ini adalah kecepatan sudut yang berubah-ubah pada generator. Sehingga, hilang sinkron antar generator dapat terjadi karena daya *output* generator yang berubah sesuai dengan berubahnya sudut rotor[6].

Jika sistem mengalami gangguan, titik kesetimbangan akan berubah sehingga mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, posisi sudut rotor generator yang lebih lambat akan meningkat. Perbedaan kecepatan tersebut akan menghasilkan perbedaan sudut yang dipengaruhi oleh hubungan daya dan sudut rotor.

Secara umum kestabilan sudut rotor dibedakan menjadi dua bagian[4], yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil
Merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan kecil. Studi kestabilan ini biasanya diamati dalam rentang waktu 10-20 detik setelah gangguan tergantung pada operasi awal sistem. Ketidakstabilan ini dapat terjadi akibat kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping.
2. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar
Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar disebut juga dengan kestabilan transien. Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan besar, seperti gangguan hubung singkat. Studi kestabilan ini biasanya diamati dalam rentang waktu 3-5 detik setelah gangguan, atau juga bisa 10-20 detik setelah gangguan jika sistemnya sangat besar.

2.3 Kestabilan Transien

Definisi dari kestabilan transien adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron ketika sistem mengalami gangguan transien. Gangguan transien merupakan gangguan besar yang bersifat tiba-tiba selama periode satu ayunan pertama.

Ketabilan transien terjadi saat pegatur tegangan otomatis (AVR) dan pengatur frekuensi (*governor*) belum bekerja.

Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya mekanis pada *prime mover* dengan daya listrik atau beban listrik pada sistem. Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator. Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti perubahan beban maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat akan terjadi perbedaan yang besar antara daya mekanis pada generator dan daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan dan perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem[7].

Oleh karena itu, studi mengenai kestabilan transien perlu dilakukan karena suatu sistem dapat dikatakan stabil ketika mencapai kestabilan *steady state*. Namun, ketika suatu sistem mencapai kestabilan transien belum tentu sistem tersebut sudah stabil. Untuk itu, dilakukan studi guna mengetahui apakah sistem dapat bertahan saat terjadi gangguan transien. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan gangguan kestabilan transien, diantaranya :

1. Beban lebih akibat generator lepas dari sistem
2. Hubung singkat
3. *Starting* pada motor
4. Perubahan beban secara tiba-tiba

2.3.1 Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat disebabkan oleh kegagalan isolasi, adanya sambaran petir, gangguan binatang ataupun ranting pohon. Ketika hubung singkat terjadi, arus yang mengalir menuju titik gangguan sangat besar sehingga tegangan di sekitar titik gangguan akan menurun secara signifikan. Semakin besar arus hubung singkat maka semakin rendah tegangan di sekitar titik gangguan. Akibatnya, kestabilan sistem menjadi terganggu. Selain itu, akibat dari gangguan ini adalah rusaknya peralatan karena nilai arus yang sangat besar.

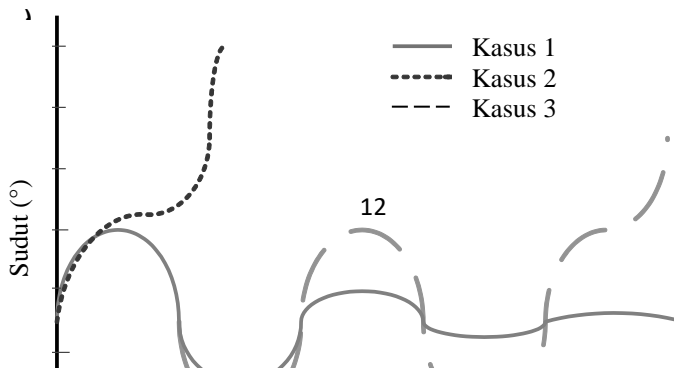
2.3.2 Starting pada Motor

Pada saat *starting* pada motor, mengalir arus *locked rotor current* (LRC), yaitu arus bernilai tinggi yang besarnya berkali-kali dari arus nominal. Nilainya bervariasi pada setiap motor. Arus yang sangat besar ini dapat mengakibatkan *drop* tegangan pada sistem. Hal ini, dikarenakan arus yang tersebut melewati impedansi saluran trafo sehingga *drop* tegangan pada saluran semakin besar. Selain itu, akibat yang ditimbulkan oleh arus ini adalah bertambahnya rugi-rugi daya aktif pada saluran sehingga dapat menurunkan frekuensi generator. *Drop* tegangan dan turunnya frekuensi ini dapat menyebabkan kestabilan sistem menjadi terganggu.

2.3.3 Penambahan Beban secara Tiba-tiba

Beban lebih pada suatu sistem tenaga listrik dapat menyebabkan terjadinya gangguan peralihan jika jumlah beban melebihi batas kestabilan dan apabila beban dinaikkan sampai terjadi osilasi, sehingga menyebabkan sistem mengalami ayunan yang melebihi titik kritis dan tidak dapat kembali.

Sesaat setelah dilakukan pembebanan beban penuh secara tiba-tiba, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar. Akibat dari pembebanan tersebut adalah frekuensi sistem akan turun dengan cepat hal ini dikarenakan arus yang diperlukan sangat besar. Dalam kondisi seperti ini, sistem berpotensi kehilangan sinkron walaupun besar beban belum mencapai batas daya maksimumnya. Penyebabnya adalah daya keluar listrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan *prime over*, dan berkurangnya energi kinetik generator. Sehingga, putaran generator turun menyebabkan frekuensi sistem juga mengalami penurunan, sudut daya δ bertambah besar hingga melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron dan sistem tidak stabil.



Waktu (s)

Gambar 2.2 Respon sudut rotor terhadap gangguan transien

Gambar 2.2 menunjukkan karakteristik mesin sinkron untuk kondisi stable dan unstable. Terdapat tiga kasus pada Gambar 2.2, yaitu:

1. Kasus pertama
Sudut rotor mengalami kenaikan hingga nilai maksimum kemudian berosilasi sehingga sudut rotor kembali mencapai kondisi stabil.
2. Kasus kedua
Rotor kehilangan sinkronisasi sehingga sudut rotor terus naik mencapai kondisi tidak stabil saat ayunan pertama. Penyebab utama pada kasus ini adalah kurangnya sinkronisasi torsi.
3. Kasus ketiga
Sistem tetap stabil saat ayunan pertama namun pada kondisi akhir sistem menjadi tidak stabil. Bentuk tidak stabil pada kasus ini umumnya terjadi bukan akibat dari gangguan transien melainkan akibat dari gangguan dinamik.

Sudut rotor, frekuensi, dan periode transien akan berubah selama periode transien dan magnitude dari tegangan kumparan medan akan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

1. Arus induksi pada kumparan peredam (*damper winding*) selama terjadinya perubahan nilai arus pada kumparan jangkar. Periode ini terjadi pada 0,1 s dan disebut efek subtransient
2. Arus induksi pada kumparan medan selama terjadinya perubahan mendadak pada arus kumparan jangkar. Periode ini terjadi pada 2 s dan disebut efek transien.

Kestabilan transien dapat dideteksi dengan adanya gangguan yang dipertahankan dalam waktu singkat yang menyebabkan reduksi terminal mesin dan kemampuan transfer daya. Estimasi nilai transfer daya pada mesin tunggal yang terhubung ke infinite bus dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$P = \frac{V_t V_\infty}{X} \sin \delta \quad (2.3)$$

Dimana,

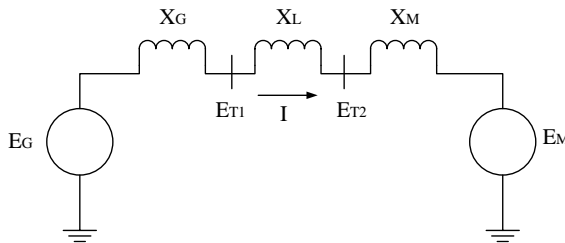
V_t = tegangan terminal mesin

V_∞ = tegangan *infinite bus*

V_t berbanding lurus dengan P, sehingga jika V_t tereduksi, maka P akan tereduksi oleh nilai terkait. Diperlukan aksi yang sangat cepat pada sistem eksitasi dalam memberikan eksitasi pada kumparan medan guna mencegah reduksi pada P. Oleh karena itu, nilai V_t akan dipertahankan pada nilai yang layak. Perubahan yang cepat juga diperlukan pada eksitasi ketika reaktansi X bertambah pada peristiwa pemutusan (*switching*).

2.3.4 Hubungan Daya dengan Sudut Rotor

Hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron adalah karakteristik yang sangat penting dalam *power system stability*. Hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron merupakan hubungan nonlinier. Gambar 2.3, gambar 2.4 dan gambar 2.5 mempresentasikan hubungan antara daya dan sudut rotor.



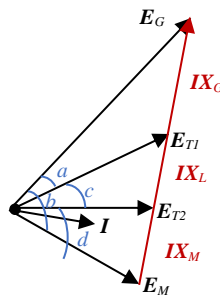
Gambar 2.3 Diagram reaktansi sistem dua mesin

Dimana:

E_G = Tegangan internal generator (p.u)

- E_M = Tegangan internal motor (p.u)
 X_G = Reaktansi internal generator (p.u)
 X_M = Reaktansi internal motor (p.u)
 X_L = Reaktansi saluran (p.u)

Misalkan terdapat suatu sistem yang terdiri dari dua mesin, dimana mesin satu mensuplai satu beban motor. Daya yang dikirimkan dari generator ke motor adalah fungsi dari perbedaan sudut (δ) antara rotor kedua mesin tersebut. Perbedaan sudut ini disebabkan oleh tiga komponen, yaitu sudut internal generator δ_G (sudut rotor generator mendahului medan putar stator), perbedaan sudut antara tegangan terminal generator dan motor δ_L (medan putar stator generator mendahului medan putar motor), dan sudut internal motor δ_M (rotor tertinggal oleh medan putar stator)[8].



Gambar 2.4Diagram fasor sistem dua mesin

Keterangan untuk Gambar 2.4 sebagai berikut :

- $a = \delta_G$
 $b = \delta$
 $c = \delta_L$
 $d = \delta_M$

$$\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M \quad (2.1)$$

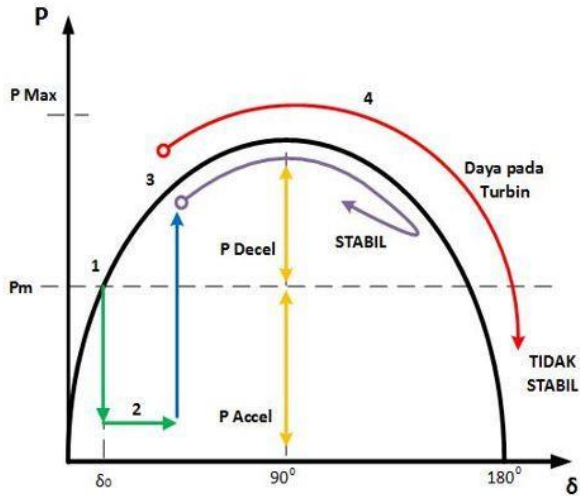
Gambar 2.4 menunjukkan diagram fasor hubungan antara tegangan internal generator (E_G) dan tegangan internal motor (E_M). Berdasarkan

Gambar 2.4, didapatkan suatu persamaan yang menyatakan hubungan antara daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut, yaitu:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.2)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2.3)$$

Pada saat terjadi gangguan, terjadi perubahan daya *input* mekanis yang erat kaitannya dengan sudut rotor generator, kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 2.5. Keadaan generator ketika belum terjadi gangguan ditunjukkan pada periode angka 0 sampai 1 (*pre-fault*). Keadaan ketika generator mengalami gangguan, pada δ_0 , mengakibatkan *output* generator mengalami penurunan drastis. Selanjutnya, hal tersebut menyebabkan adanya perbedaan antara daya *output* generator dengan daya mekanis turbin sehingga rotor pada generator mengalami percepatan dan sudut rotor naik, posisi 2. Kemudian posisi 3, keadaan ketika gangguan pada generator sudah tidak terjadi (*post-fault*). Terlihat bahwa daya *output* generator menjadi lebih besar dari daya mekanis turbin. Hal ini, menyebabkan rotor pada generator mengalami perlambatan. Apabila terdapat torsi lawan yang cukup untuk mengimbangi percepatan pada saat terjadi gangguan, maka sistem akan stabil dalam ayunan pertama. Namun jika torsi tersebut tidak mampu menahan gangguan, maka sudut rotor akan bertambah besar sehingga membuat sistem kehilangan sinkronisasi[2].



Gambar 2.5 Respon generator saat terjadi gangguan

2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

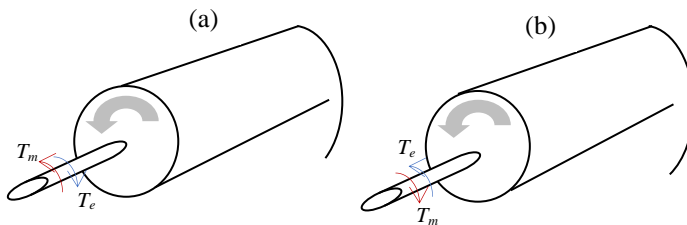
Persamaan yang mengatur putaran rotor suatu mesin sinkron berdasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil kali dari momen kelambaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Untuk generator sinkron, persamaan ayunan dapat ditulis sebagai berikut:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.4)$$

Dimana,

- J : Momen inersia total dari massa rotor dalam kg-m²
- θ_m : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)
- T_e : Momen putar listrik atau elektromagnetik, (N-m)
- T_a : Momen putar kecepatan percepatan bersih (*net*), (N-m)
- t : Waktu dalam detik (s)
- T_m : Momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh *prime mover* dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (N-m)

Jika torsi mekanis T_m dianggap positif pada generator sinkron, maka hal ini menandakan bahwa T_m adalah resultan torsi yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran θ_m yang positif. Sedangkan jika T_m bernilai negatif, menandakan bahwa T_m memiliki kecenderungan untuk memperlambat rotor dalam arah putaran θ_m yang positif. Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektrik akan ditunjukkan pada gambar 2.6. Sementara itu, jika T_m sama dengan T_e dan T_a sama dengan nol untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap (*steady state*). Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan sinkron. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan *prime over* berada pada keadaan sinkron dalam sistem daya tersebut.



Gambar 2.6 Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektrik (a) Generator (b) Motor

Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap, T_m dan T_e adalah sama sedangkan momen putar T_a sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk melukiskan pengaruh pada T_m .

Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron ω_{sm} maka:

$$T_m = T_e \quad (2.5)$$

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) seperti yang terdapat pada Gambar 2.4 dimana:

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.6)$$

Pada persamaan (2.4) karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.7)$$

Dimana,

ω_{sm} : Kecepatan sinkron mesin (*radian/detik*)

δ_m : Sudut pergeseran rotor, dalam *mechanical radians*, dari sumbu referensi putaran sinkron (derajat)

Dengan θ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.7) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.8)$$

Dimana percepatan rotornya adalah

$$\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.8) menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor $\frac{d\theta_m}{dt}$ adalah konstan dan kecepatan sinkron hanya saat $\frac{d\delta_m}{dt}$ adalah nol. Oleh karena itu, $\frac{d\delta_m}{dt}$ menunjukkan deviasi kecepatan rotor saat sinkron dengan satuan pengukuran *mechanical radians per detik*. Persamaan (2.9) merepresentasikan percepatan rotor diukur pada mekanikal radian per *second* kuadrat. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.9) pada (2.6), maka didapatkan :

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (2.10)$$

Untuk mempermudah persamaan kecepatan sudut rotor didefinisikan sebagai berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.11)$$

Menurut prinsip dasar dinamika rotor yang menyatakan bahwa daya (P) adalah perkalian antara torsi dengan kecepatan sudut, maka jika persamaan (2.10) dikalikan dengan ω_m akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e W \quad (2.12)$$

Dimana,

P_m : Daya mekanis

P_e : Daya elektrik

P_a : Daya percepatan yang menyumbang ketidakseimbangan keduanya

Koefisien $J \omega_m$ adalah momentum sudut rotor pada kecepatan sinkron ω_{sm} dan dinotasikan dengan M (konstanta inersia mesin). Satuan M adalah *joule-seconds per mechanical radian*, sehingga persamaan juga dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (2.13)$$

Dalam data mesin untuk studi stabilitas transien terdapat suatu konstanta yang sering dijumpai yaitu inersia mesin (H) yang didefinisikan dengan,

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam megajoule pada kecepatan sinkron}}{\text{rating mesin dalam MVA}} \quad (2.14)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad \text{MJ/MVA} \quad (2.15)$$

Dimana S_{mach} adalah rating 3 fase dari mesin dalam MVA. Dengan menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai M pada persamaan (2.13), didapatkan :

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad \text{MJ/mech rad} \quad (2.16)$$

Dengan mensubstitusikan M di persamaan (2.13), didapatkan :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.17)$$

δ_m memiliki satuan *mechanical radians* pada persamaan (2.17), dimana ω_{sm} memiliki satuan *mechanical radians per second*. Oleh sebab itu persamaan dapat ditulis sebagai :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (2.18)$$

Dengan $\omega_s = 2\pi f$, maka persamaan (2.18) menjadi,

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.19)$$

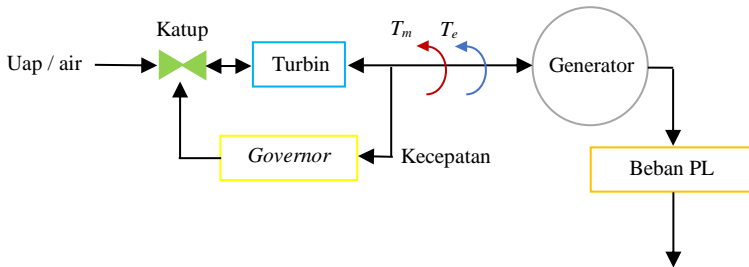
Saat δ dalam *electrical radians*,

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) menjelaskan *swing equation* mesin berupapersamaan dasar yang mengatur dinamika rotasi dari mesin sinkron pada studi stabilitas.

2.5 Pengaturan Frekuensi

Nilai frekuensi pada suatu sistem kelistrkan sangat berubungan erat dengan kecepatan putar turbin. Untuk mendapatkan frekuensi yang konstan maka putaran turbin juga harus konstan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengaturan kecepatan oleh *speed governor*. Gambar 2.7 berikut merupakan blok diagram sederhana yang menggambarkan cara kerja *speed governor*.



Gambar 2.7 Blok diagram kerja *speed governor*

Keterangan:

- T_m = torsi mekanik
- P_m = daya mekanik
- T_e = torsi elektrik
- P_e = daya elektrik
- P_L = Daya beban

Pada saat terjadi perubahan beban, maka akan terjadi perubahan torsi elektrik (T_e) pada generator dalam waktu yang bersamaan. Hal tersebut, mengakibatkan adanya perbedaan antara torsi mekanik (T_m) dan torsi elektrik (T_e) yang menimbulkan perbedaan kecepatan. Perbedaan ini akan dirasakan oleh *governor*[8].

Kerja *governor* berhubungan dengan daya aktif pada sistem. Penyediaan daya aktif sistem harus sesuai dengan kebutuhan agar frekuensi tetap dalam batas yang diijinkan. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur kopel mekanis untuk memutar generator, hal ini dilakukan dengan cara mengatur pemberian bahan bakar turbin oleh *governor* yang membuka atau menutup katup (*valve*) bahan bakar. ketika frekuensi turun dari nominalnya, *governor* akan menambah kapasitas bahan bakar sedangkan ketika frekuensi naik dari nominalnya, *governor* akan mengurangi kapasitas bahan bakar. Mode operasi *speed governor* dibagi menjadi dua, yaitu *mode droop* dan *mode isochronous*.

2.5.1 Mode Droop

Pada *mode droop*, *governor* sudah memiliki *set point* daya mekanik yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan.

Adanya *fixed setting* menyebabkan nilai *output* daya listrik generator akan tetap. Sehingga, perubahan beban tidak mempengaruhi putaran turbin[9].

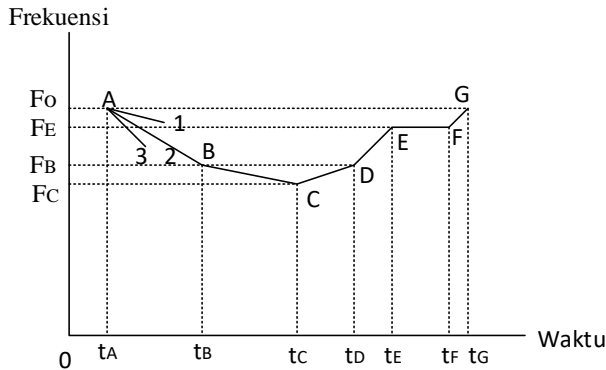
2.5.2 Mode Isochorus

Pada mode isochronous, *set point* putaran *governor* ditentukan berdasarkan kebutuhan daya pada sistem saat itu secara *real time*. *Governor* akan menyesuaikan nilai *output* daya mekanik turbin agar sesuai dengan daya listrik yang dibutuhkan oleh sistem. Caranya dilakukan dengan mengatur *governor* berdasarkan *logic control* dari pabrikan generator. Apabila terjadi perubahan beban, *governor* akan menentukan *set point* yang baru sesuai dengan beban aktual. Pegaturan *set point* ini dapat menjaga frekuensi sistem tetap berada dalam batas yang diizinkan sehingga generator tidak mengalami *loss of synchronization*[10].

2.6 Pelepasan Beban

Pelepasan beban atau *load shedding* merupakan salah satu cara untuk mempertahankan kestabilan jika terjadi gangguan pada sistem. Jika terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan besarnya suplai daya yang dihasilkan oleh pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban, misalnya karena adanya pembangkit yang lepas (*trip*), menyebabkan *prime over* generator akan melambat karena memikul beban melewati kapasitas. Apabila hal ini tidak segera diatasi, maka akan menimbulkan turunnya frekuensi sistem diluar standar yang diijinkan. Oleh karena itu, untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan sistem perlu dilakukan pelepasan beba. Keadaan yang kritis pada sistem dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat.

Pokok permasalahan dari pelepasan beban pada suatu sistem adalah menentukan jumlah pelepasan beban, macam-macam beban yang dilepas pertahap, frekuensi, dan keterlambatan waktu yang akan direncanakan pada setiap pelepasan. Pelepasan beban harus bisa menahan frekuensi sistem agar tetap pada standar yang diijinkan. Berikut, pada gambar 2.8 dijelaskan mengenai respon frekuensi akibat kehilangan suplai daya.



Gambar 2.8 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban

Saat $t=t_A$, sistem mulai kehilangan daya akibat adanya pembangkit yang lepas sehingga frekuensi menurun dengan tajam. Penurunan frekuensi sistem ini bisa melalui garis 1, 2 atau 3 bergantung pada besarnya kapasitas pembangkit yang lepas dibandingkan dengan kebutuhan beban yang ada. Semakin besar daya yang yang hilang maka akan semakin cepat frekuensi menurun. Kecepatan menurunnya frekuensi sistem juga bergantung pada inersia sistem. Semakin besar nilai inersia maka semakin lambat penurunan frekuensi. Berikut penjelasan mengenai gambar 2.8 :

- A. Dimisalkan penurunan frekuensi terjadi pada garis 2, dari garis 2 frekuensi turun secara drastis. Ketika frekuensi mencapai FB maka akan dilakukan *load shedding* tahap 1 (titik B). Dengan adanya *load shedding* tahap 1 membuat penurunan frekuensi turun secara melambat.
- B. Ketika terjadi penurunan frekuensi hingga FC maka akan dilakukan *load shedding* tahap 2 (titik C). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 2 frekuensi sistem menjadi naik. Namun kenaikan frekuensi masih terlalu lambat sehingga untuk mencapai frekuensi normal membutuhkan waktu yang lama.
- C. Ketika frekuensi mencapai frekuensi FB perlu dilakukan *load shedding* tahap 3 (titik D). Dengan adanya *load shedding* tahap 3 untuk mencapai frekuensi normal dapat dilakukan sedikit lebih

cepat namun kecepatannya kenaikan masih terlalu lambat untuk mencapai frekuensi normal.

D. Sehingga ketika mencapai frekuensi FE dilakukan *load shedding* tahap 4 (titik E). Dengan adanya *load shedding* tahap 4 membuat frekuensi sistem menjadi stabil.

E. Namun kestabilan frekuensi sistem masih dibawah standart yang ada sehingga ketika $t=t_F$ dilakukan *load shedding* tahap 5 (titik F). Akibat *load shedding* tahap 5 membuat frekuensi sistem kembali ke frekuensi normal.

Tujuan dilakukannya pelepasan beban adalah agar jumlah suplai daya dan permintaan beban seimbang. Pelepasan beban dapat dilakukan dengan dua cara yaitu pelepasan beban secara manual (*Manual Load Shedding*) dan pelepasan beban secara otomatis (*Automatic Load Shedding*).

2.6.1 Pelepasan Beban Secara Manual

Pelepasan beban secara manual dilakukan dengan cara membuka *circuit breaker* yang dilakukan oleh operator. Metode ini hanya dapat digunakan dalam keadaan yang tidak begitu genting, misalnya terdapat penambahan beban yang melebihi kapasitas pembangkit atau adanya gangguan yang menyebabkan turunnya tegangan dan frekuensi pada sistem. Jika terjadi keadaan darurat, seperti turunnya tegangan hingga 80%, operator akan mengambil inisiatif sendiri untuk melakukan pelepasan beban untuk mempertahankan kestabilan sistem. Kekurangan dari pelepasan beban secara manual adalah apabila terjadi keterlambatan operator dalam mengatasi permasalahan pada sistem akan berakibat fatal pada stabilitas sistem.

2.6.2 Pelepasan Beban secara Otomatis

Pelepasan beban secara otomatis merupakan metode yang tepat jika digunakan dalam keadaan genting. Metode ini dilakukan dengan menggunakan rele berdasarkan sensor-sensor tertentu.

2.6.2.1 Pelepasan Beban secara Otomatis Menggunakan Underfrequency Relay (81U)

Pelepasan beban secara otomatis menggunakan *underfrequency relay* dilakukan berdasarkan seberapa besar turunnya frekuensi pada sistem. Perencanaan dan *setting* rele *underfrequency* untuk *load shedding* harus dalam kondisi beban lebih sehingga generator tidak mampu memenuhi

kebutuhan beban. Dengan berlebihnya beban yang ditanggung oleh generator maka frekuensi sistem akan turun. Untuk menghindari *black out* akibat generator *overload* maka diperlukan load shedding. Sehingga, ketika terjadi gangguan yang mengakibatkan turunnya frekuensi sistem hingga batas yang tidak diijinkan, maka beban akan terlepas dengan sendirinya sesuai dengan *setting* rele *underfrequency*.

Pelepasan beban tidak dilakukan secara bersamaan dalam satu waktu, namun dilakukan secara bertahap. Hal ini, dilakukan untuk menghindari terjadinya overvoltage. Setting rele *underfrequency* mempunyai beberapa settingan sesuai dengan tahapan pelepasan beban. Rele *underfrequency* ditempatkan pada *substation-substation* dan menginterkoneksi dengan pemutus daya pada *feeder* yang ingin di lepas.

2.6.2.1 Pelepasan Beban secara Otomatis Menggunakan Lockout Relay (86)

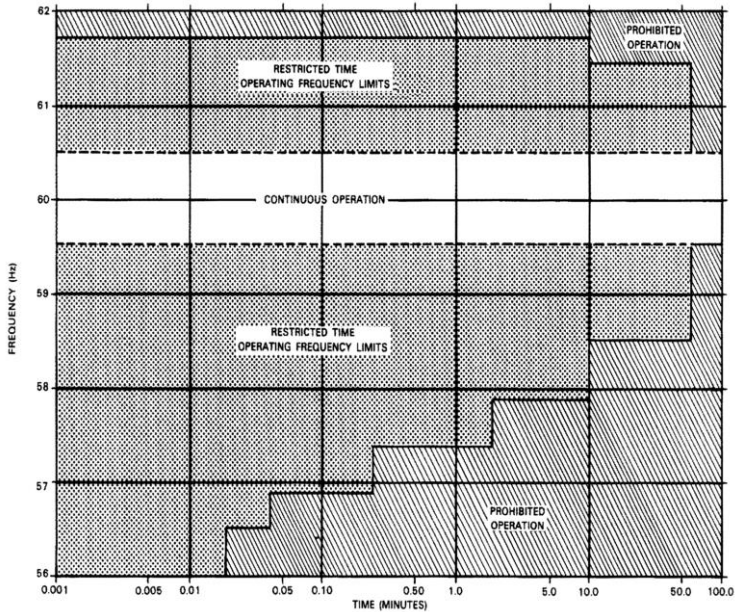
Pelepasan Beban secara Otomatis Menggunakan *Lockout Relay* disebut juga dengan pelepasan beban menggunakan status. Pelepasan beban dikalkukan berdasarkan status tertentu yang telah direncanakan pada suatu sistem kelistrikan. Misalnya, pada kasus *generator outage* pada sistem kelistrikan skala besar memerlukan dari satu tahap load shedding sehingga untuk menanggulangi penurunan frekuensi yang cepat maka ditetapkan sebuah status pada *lockout relay* dimana beban akan dilepas secara bersamaan hingga sistem kembali stabil.

2.7 Standar yang Berkaitan dengan Analisa Kestabilan Transien

Dalam melakukan analisa kestabilan transien, ada beberapa standar yang perlu diperhatikan, diantaranya adalah standar frekuensi, standar tegangan dan standar pelepasan beban. Ketiga aspek tersebut penting untuk diperhatikan karena sangat berkaitan erat dengan kestabilan pada suatu sistem tenaga listrik.

2.7.1 Standar Frekuensi

Berdasarkan IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987), operasi frekuensi yang diijinkan ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Standar frekuensi untuk turbin uap (IEEE Std C37.106-2003)

Pada gambar 2.9 terdapat 3 daerah operasi untuk *steam turbine generator*, yakni:

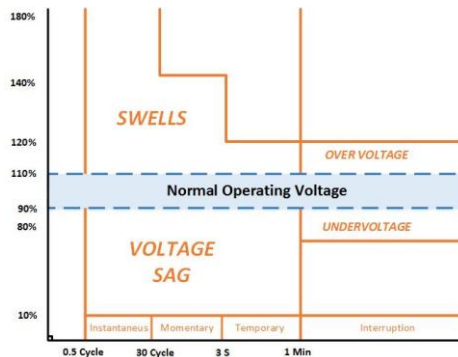
1. *Restricted time operating frequency limits*
Daerah frekuensi yang masih diijinkan namun hanya bersifat sementara, tergantung besar frekuensi dan waktu. Semakin besar turun frekuensinya maka semakin pendek waktu yang diijinkan pada kondisi tersebut.
2. *Prohibited operation*
Daerah frekuensi terlarang, frekuensi tidak diijinkan mencapai daerah tersebut.
3. *Continuous operation*
Daerah frekuensi normal.

Masing-masing produsen memiliki karakteristik tertentu untuk batas operasi frekuensi *abnormal*. Batas tersebut dapat direpresentasikan dalam grafik untuk penentuan pengaturan perangkat pelindung. Gambar 2.9 merupakan standar untuk menggambarkan batas operasional turbin uap. Daerah antara 59,5 dan 60,5 Hz adalah batas daerah operasi yang

dijijinkan, sedangkan daerah diatas 60,5 Hz dan dibawah 59,5 Hz adalah daerah yang dilarang. Jika dikonversikan dalam standar sistem frekuensi 50 Hz maka 59,5 Hz sama dengan 49,58 Hz (99,17%) dan 60,5 Hz sama dengan 50,42 Hz (100,83%).

2.7.1 Standar Tegangan

Berdasarkan gambar 2.10 dibawah ini, kedip tegangan yang diijinkan adalah 10% untuk instantaneous 30 cycle, untuk momentary selama 3 detik dan untuk temporary selama 1 menit.



Gambar 2.10 *Voltage Magnitude Event* berdasarkan standar IEEE 1195-1995

Ketika tegangan pada sistem sudah stabil, mkama standar yang digunakan untuk tegangan nominal dalam kondisi normal adalah berdasarkan standar PLN, yaitu :

500 kV +5%, -5%

150 kV +5%, -10%

70 kV +5%, -10%

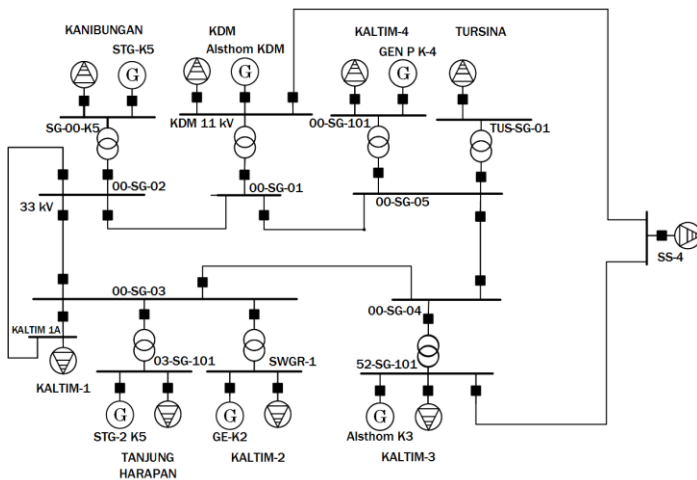
20 kV +5%, -10%

BAB 3

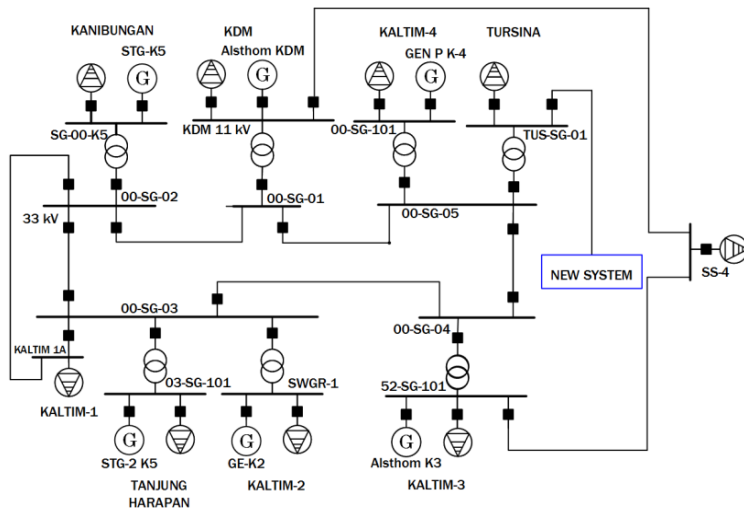
SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Pupuk Kalimantan Timur

Untuk menunjang kontinuitas aliran daya pada PT. Pupuk Kalimantan Timur, sistem kelistrikan pabrik dirancang dengan mengintegrasikan tiap-tiap pabrik ke dalam suatu ring bus 33 kV. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur terdiri dari beberapa area dengan total pembangkit yang beroperasi sebanyak 11 pembangkit. 5 dari 11 pembangkit tersebut merupakan *plant* baru guna meningkatkan produksi PT. Pupuk Kalimantan Timur. Kelima pembangkit tersebut diantaranya New Gen 1, New Gen 2, New Gen 3, New Gen 4 dan New Gen 5 yang tergabung dalam New Island Tursina yang merupakan pengembangan *feeder outgoing* Tursina, dengan kapasitas pembangkit masing-masing sebesar 34 MW. Selanjutnya, *plant* baru ini akan dihubungkan dengan sistem integrasi eksisting melalui Bus Tursina 33 kV. Bagan mengenai sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sebelum dan setelah penambahan pembangkit dapat dilihat pada gambar 3.1 dan gambar 3.2.

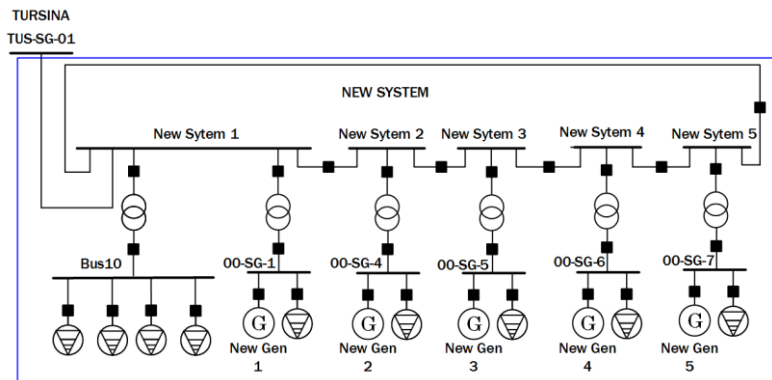


Gambar 3.1 Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sebelum penambahan beban



Gambar 3.2 Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur setelah penambahan beban

Sistem kelistrikan tambahan pada PT. Pupuk Kalimantan Timur dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3New System

3.2 Data Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur

Jumlah total pembangkitan, pembebanan, dan *demand* dapat dilihat pada tabel 3.1 :

Tabel 3.1Jumlah total pembangkitan, pembebanan, dan *demand*

Keterangan	MW	MVAr	MVA	%PF
<i>Source (swing bus)</i>	16.167	21.595	29.976	69.93 Lag
<i>Source (non swingbus)</i>	196.000	112.915	225.902	86.76 Lag
<i>Total Demand</i>	212.167	133.915	250.894	84.56 Lag
<i>Total Motor Load</i>	194.923	119.245	228.504	85.30 Lag
<i>Total Static Load</i>	16.850	9.683	19.434	86.70 Lag
<i>Apparent Losses</i>	0.394	4.987		

Jumlah total *demand* pada PT. Pupuk Kalimantan Timur adalah 212.167 MW, 133.915 Mvar, dan 250.894 MVA.

3.1.1 Sistem Pembangkitan PT. Pupuk Kalimantan Timur

Pembangkit Alsthom KDM dioperasikan sebagai *swing* sedangkan 10 pembangkit yang lain dioperasikan sebagai *voltage control*. Tabel 3.2 dan tabel 3.3 merupakan data pembangkit beserta *setting exciter*.

Tabel 3.2Data pembangkit

Power Plant	ID Unit	Tegangan (kV)	Kapasitas (MW)	Operasi (MW)
KDM	Alsthom KDM	11	30	16.167
Kanibungan	STG-K5	11	30	18
Tanjung Harapan	STG2 K5	11	30	18
	GE-K2	11	36.4	20
	Alsthom K3	11	30	18
Tursina	GEN P K-4	11	21.6	12
New System	New Gen 1	11	34	22
	New Gen 2	11	34	22
	New Gen 3	11	34	22
	New Gen 4	11	34	22
	New Gen 5	11	34	22

Tabel 3.3 *Setting exciter*

Parameter	Definisi	Nilai	
		Tipe 1	Tipe 2
VR max	<i>Maximum value of the regulator output voltage (p.u)</i>	17.5	16.37
VR min	<i>Minimum value of the regulator output voltage (p.u)</i>	-15.5	0
KA	<i>Regulator gain (p.u)</i>	250	16.36
KF	<i>Regulator stabilizing circuit gain (p.u)</i>	0.06	0.075
TA	<i>Regulator amplifier time constant (sec)</i>	0.03	0.02
TE	<i>Voltagea regulator time constant (sec)</i>	1.25	0.6
TF1	<i>Regulator stabilizing circuit time constant (sec)</i>	1	0.6
TR	<i>Regulator input filter time constant (sac)</i>	0.005	0

Pembangkit yang termasuk ke dalam tipe 1 atau tipe 2 untuk *setting exciter* pada tabel 3.3 adalah sebagai berikut:

Tipe 1 : STG-K5, STG2 K5.

Tipe 2 : Alsthom KDM, GE-K2, Alsthom K3, GEN P K-4, New Gen 1, New Gen 2, New Gen 3, New Gen 4, New Gen 5.

3.1.2 Sistem Distribusi PT. Pupuk Kalimantan Timur

Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur pada New Island Tursina menggunakan sistem distribusi ring untuk menghubungkan jaringan kelistrikannya. Terdapat 3 level tegangan pada sistem distribusi New Island Tursina dengan tegangan distribusi 33KV, 11KV, dan 6.9KV.

Pada tabel 3.4 akan ditunjukkan data mengenai 19 transformator yang beroperasi untuk menunjang sistem distribusi PT. Pupuk Kalimantan Timur sebelum masuk ke beban guna menurunkan atau menaikkan tegangan.

Tabel 3. 4Data transformator distribusi di PT. Pupuk Kalimantan Timur

No	ID	Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	%Z	Hubungan
1	KDM-TR-01	25	33/11	10	wye/delta
2	IT KANIBUNGAN	25	33/33	12.5	delta/wye
3	K1-TR-01A	15	33/6.6	10	wye/delta
4	KA -TR-01	37.5	33/11	12.5	wye/delta
5	TH-TR-STG2	37.7	33/11	12.5	delta/wye
6	IT TANJUNG HARAPAN	12.5	33/33	12.5	delta/wye
7	K1-TR-01B	15	33/6.6	10	wye/delta
8	K2-TR-01	25	33/11	10	wye/delta
9	K3-TR-01	25	33/11	10	wye/delta
10	52-TX-411	12.5	11/6.9	6.08	delta/wye
11	IT TURSINA	40	33/33	12.5	delta/wye
12	TU-TR-01	15	33/11	10	delta/wye
13	TU-TR-03	15	33/20	7	delta/wye
14	Trafo NPK SA	30	33/6.9	7	delta/wye
15	New TRAFO 1	25	33/11	12.5	delta/wye
16	New TRAFO 2	25	33/11	12.5	delta/wye
17	New TRAFO 3	25	33/11	12.5	delta/wye
18	New TRAFO 4	25	33/11	12.5	delta/wye
19	New TRAFO 5	25	33/11	12.5	delta/wye

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan

Analisis kestabilan transien perlu dilakukan pada setiap sistem kelistrikan industri, terlebih untuk sistem kelistrikan besar yang mengoperasikan lebih dari dua pembangkit. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar dapat melakukan tindakan yang tepat apabila terjadi gangguan pada sistem tersebut. Untuk itu, perlu dilakukan pemodelan sistem kelistrikan untuk dianalisis lebih lanjut.

Berdasarkan data-data yang telah disampaikan pada bab 3, maka dilakukan pemodelan sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur dalam bentuk *single line diagram*. Berikutnya, dilakukan simulasi dan analisis kestabilan transien dengan beberapa kasus yang kemungkinan dapat menimbulkan terjadinya gangguan. Pada tugas akhir ini analisis dilakukan ketika terjadi gangguan berupa *generator outage* dan *short circuit*.

4.2. Studi Kasus Kestabilan Transien

Analisis kestabilan transien dapat dilakukan dengan menjalankan simulasi. Beberapa kasus yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem kelistrikan pada PT. Pupuk Kalimantan Timur akan disimulasikan.

Pada simulasi ini dilakukan analisis kestabilan transien dan mekanisme pelepasan beban akibat gangguan yang disebabkan oleh adanya *generator outage* dan *short circuit*. Parameter-parameter yang diperhatikan dalam tugas akhir ini adalah respon dari frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada sistem.

Studi kasus yang akan disimulasikan, diantaranya:

1. *Generator outage*
Terdapat satu hingga tiga generator outage dari sistem.
2. *Short circuit*
Terjadi hubung singkat pada lima bus dengan masing-masing level tegangan yang berbeda

Untuk penjelasan lebih detail mengenai masing-masing kasus yang akan disimulasikan dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1Studi kasus kestabilan transien

No	Kasus	Keterangan
1	GE-K2 <i>trip</i>	Generator GE-K2 <i>outage</i> dari sistem
2	New Gen 1 <i>trip</i>	Generator New Gen 1 <i>outage</i> dari sistem
3	New Gen 1 + GEN P K-4 <i>trip</i>	Generator New Gen 1 dan GEN P K-4 <i>outage</i> dari sistem
4	STG-K5 + STG2 K-5 <i>trip</i>	Generator STG-K5 dan GEN P K-4 <i>outage</i> dari sistem
5	GE-K2 + New Gen 1 <i>off</i> + New Gen 2 <i>trip</i>	Generator New Gen 2 <i>outage</i> dari sistem ketika generator GE-K2 dan New Gen 1 tidak beroperasi
6	GE-K2 + New Gen 1 <i>off</i> + New Gen 2 <i>trip</i>	Generator New Gen 2 <i>outage</i> dari sistem ketika generator GE-K2 dan New Gen 1 tidak beroperasi, dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
7	GE-K2 + Alsthom K3 <i>off</i> + New Gen 1 <i>trip</i>	Generator New Gen 1 <i>outage</i> dari sistem ketika generator GE-K2 dan Alsthom K3 tidak beroperasi
8	GE-K2 + Alsthom K3 <i>off</i> + New Gen 1 <i>trip</i> + LS	Generator New Gen 1 <i>outage</i> dari sistem ketika generator GE-K2 dan Alsthom K3 tidak beroperasi, dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
9	New Gen 1 + New Gen 2 <i>off</i> + GEN P K-4 <i>trip</i>	Generator GEN P K-4 <i>outage</i> dari sistem ketika generator New Gen 1 dan New Gen 2 tidak beroperasi
10	New Gen 1 + New Gen 2 <i>off</i> + GEN P K-4 <i>trip</i>	Generator GEN P K-4 <i>outage</i> dari sistem ketika generator New Gen 1 dan New Gen 2 tidak beroperasi, dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
11	SC 6.6 kV	Gangguan hubung singkat di bus KALTIM 1A dilanjutkan CB <i>open</i> setelah terjadi gangguan
12	SC 6.9 kV	Gangguan hubung singkat di bus 52-SG-411 dilanjutkan CB <i>open</i> setelah terjadi gangguan
13	SC 11 kV	Gangguan hubung singkat di bus BUS1 dilanjutkan CB <i>open</i> setelah terjadi gangguan

Tabel 4.1. Studi kasus kestabilan transien (lanjutan)

No	Kasus	Keterangan
14	SC 20 kV	Gangguan hubung singkat di bus TU-SG-02 dilanjutkan CB <i>open</i> setelah terjadi gangguan
15	SC 33 kV	Gangguan hubung singkat di bus RING 33 dilanjutkan CB <i>open</i> setelah terjadi gangguan

4.2.1 Generator Outage

Pada studi kasus *generator outage*, dilakukan studi kasus terjadi satu *generator outage* hingga tiga *generator outage* pada sistem. Studi kasus tersebut diantaranya:

1. Satu generator lepas (*trip*) saat sistem beroperasi normal
2. Dua generator lepas (*trip*) saat sistem beroperasi normal
3. Satu generator lepas (*trip*) saat dua generator lainnya tidak berfungsi (*off*) sebelum sistem beroperasi

Dengan adanya *generator outage* menyebabkan sistem kehilangan suplai daya sehingga untuk beberapa kasus membutuhkan mekanisme *load shedding*. Tujuannya adalah agar sistem tetap beroperasi normal setelah terjadi gangguan.

Pada studi kasus *generator outage*, bus yang digunakan sebagai parameter kestabilan transien sistem adalah:

1. Bus KALTIM 1A mewakili tegangan 6.6 kV
2. Bus BUS10 mewakili tegangan 6.9 kV
3. Bus KDM 11, SG-00-K5, 03-SG-101, SWGR-1, 52-SG-101, 00-SG-101, 00-SG-1 mewakili tegangan 11 kV yang merupakan bus utama pada setiap generator pada sistem.
4. Bus TU-SG-02 mewakili tegangan 20 kV
5. Bus New System 1 mewakili tegangan 33 kV

4.2.2 Short Circuit

Pada kasus gangguan *short circuit* tidak semua bus disimulasikan terjadi gangguan hubung singkat, hanya beberapa bus yang mewakili setiap level tegangan. Bus yang disimulasikan mengalami gangguan hubung singkat, diantaranya:

1. Bus KALTIM 1A mewakili tegangan 6.9 kV
2. Bus 52-SG-411 mewakili tegangan 6.6 kV
3. Bus BUS1 mewakili tegangan 11 kV

4. Bus TU-SG-02 mewakili tegangan 20 kV
5. Bus RING 33 mewakili tegangan 33 kV

Pada kasus gangguan *short circuit* bus yang digunakan sebagai parameter kestabilan transien sistem adalah:

1. Bus KALTIM 1A mewakili tegangan 6.6 kV
2. Bus BUS10 mewakili tegangan 6.9 kV
3. Bus KDM 11, SG-00-K5, 03-SG-101, SWGR-1, 52-SG-101, 00-SG-101, 00-SG-1 mewakili tegangan 11 kV yang merupakan bus utama pada setiap generator pada sistem.
4. Bus TU-SG-02 mewakili tegangan 20 kV
5. Bus New System 1 mewakili tegangan 33 kV

4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Mekanisme Load Shedding

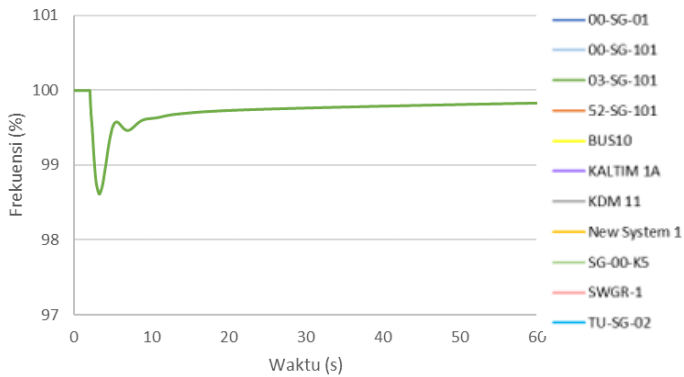
Pada bagian ini akan dijelaskan hasil analisis kestabilan transien berdasarkan simulasi untuk tiap studi kasus yang telah ditentukan. Hasil yang akan dianalisis meliputi respon frekuensi dan tegangandari masing-masing bus yang telah ditentukan sebelumnya, dan juga sudut rotor generator yang terinterkoneksi ke sistem.

4.3.1. Simulasi Kestabilan Transien Generator Outage

Pada sub bab 4.3.1 akan dilakukan simulasi kestabilan transien untuk studi kasus *generator outage*.

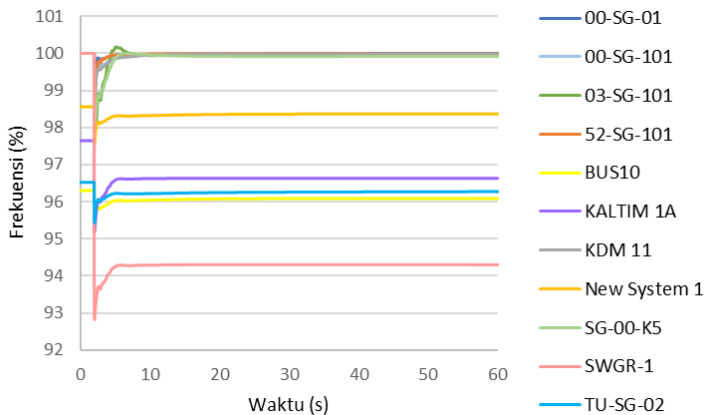
4.3.1.1 Studi Kasus GE-K2 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator GE-K2 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sementara 10 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



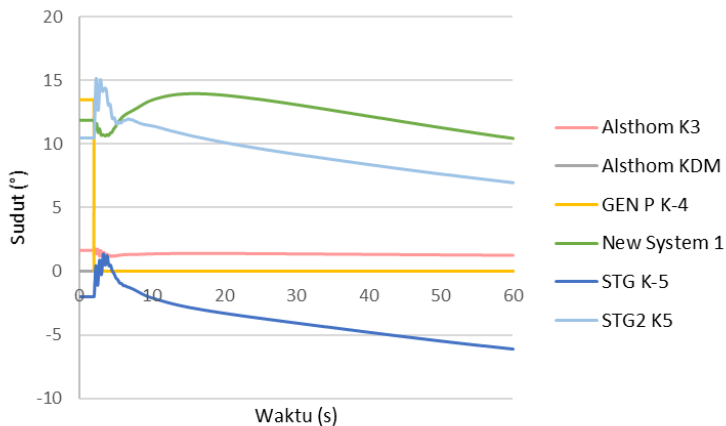
Gambar 4.1 Respon frekuensi saat GE-K2 lepas dari sistem

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98.6% pada detik ke 3.201. Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya sebesar 20 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99.83% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.2 Respon tegangan saat GE-K2

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 99.34% dan kembali stabil pada 99.99%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 98.78% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 98.14% dan kembali stabil pada 99.95%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 98.43% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 95.2% dan kembali stabil pada 96.08%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 95.18% dan kembali stabil pada 96.62%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 98.58% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 97.54% dan kembali stabil pada 98.36%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 98.09% dan kembali stabil pada 99.91%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 92.82% dan kembali stabil pada 94.29%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 95.43% dan kembali stabil pada 96.27%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



Gambar 4.3 Respon sudut rotor saat GE-K2 lepas dari sistem

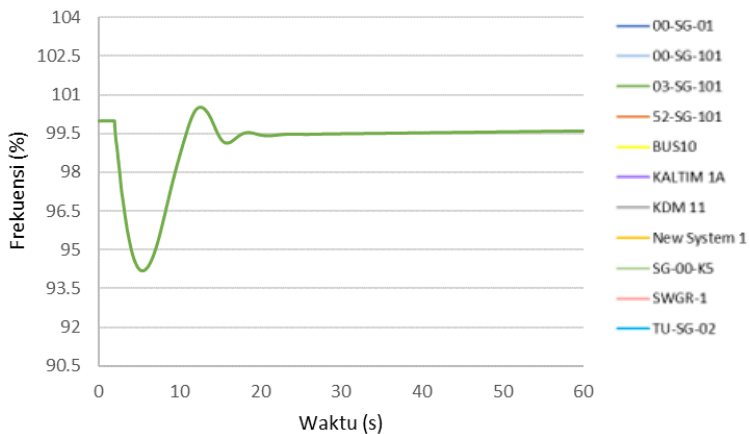
Gambar 4.3 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap *swing* generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika

Generator GE-K2 lepas dari sistem pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alshtom K3 mengalami perubahan sudut hingga 0.64° dan kembali stabil pada 1.25° . Generator. Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 2.98° dan kembali stabil pada -0.46° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 3.52° dan kembali stabil pada 10.44° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 7.48° dan kembali stabil pada -6.12° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 8.2° dan kembali stabil pada 1.26° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus GE-K2 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

4.3.1.2 Studi Kasus New Gen 1 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

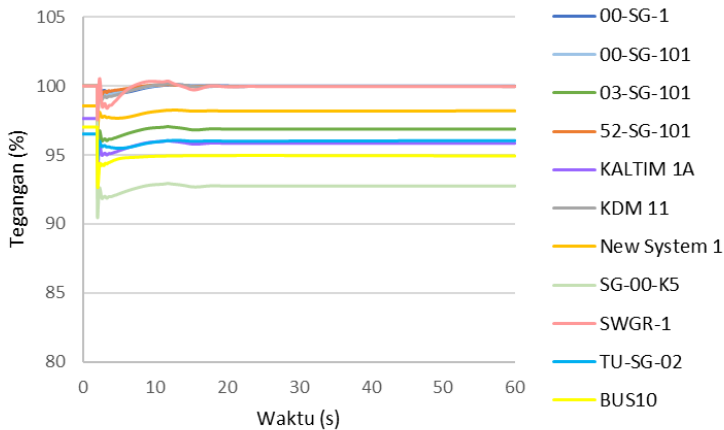
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator New Gen 1 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sementara 10 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



Gambar 4.4 Respon frekuensi saat New Gen 1 lepas dari sistem

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan

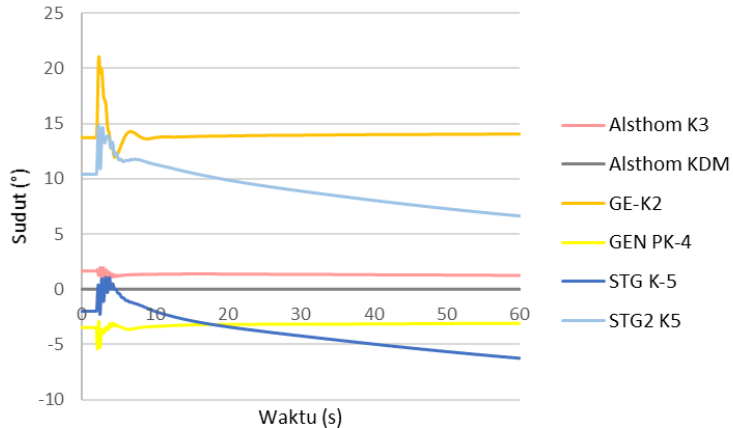
kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 94.17% pada detik ke 5.301. Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya sebesar 22 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99.61 dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.5 Respon tegangan saat New Gen 1 lepas dari sistem

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 98.9% dan kembali stabil pada 100%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 97.99% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 94.69% dan kembali stabil pada 96.88%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 99.98% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 92.63% dan kembali stabil pada 94.93%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 93.64% dan kembali stabil pada 95.86%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 97.64% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 96.88% dan kembali stabil pada 98.2%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 90.46% dan kembali stabil pada 92.475%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 97.55% dan

kembali stabil pada 99.96%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 94.71% dan kembali stabil pada 96.05%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



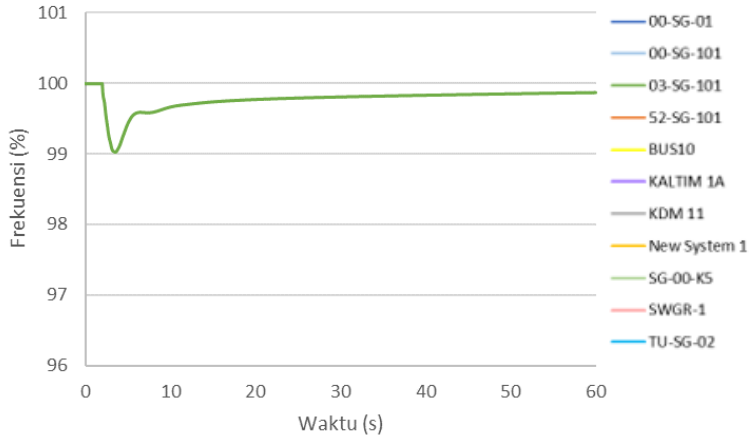
Gambar 4.6 Respon sudut rotor saat New Gen 1 lepas dari sistem

Gambar 4.6 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika Generator New Gen 1 lepas dari sistem pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 1.03° dan kembali stabil pada 1.26° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 9.11° dan kembali stabil pada 14.05° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 2.51° dan kembali stabil pada -3.08° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 7.31° dan kembali stabil pada -6.24° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 7.31° dan kembali stabil pada -6.24° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 8.16° dan kembali stabil pada 6.64° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus New Gen 1 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

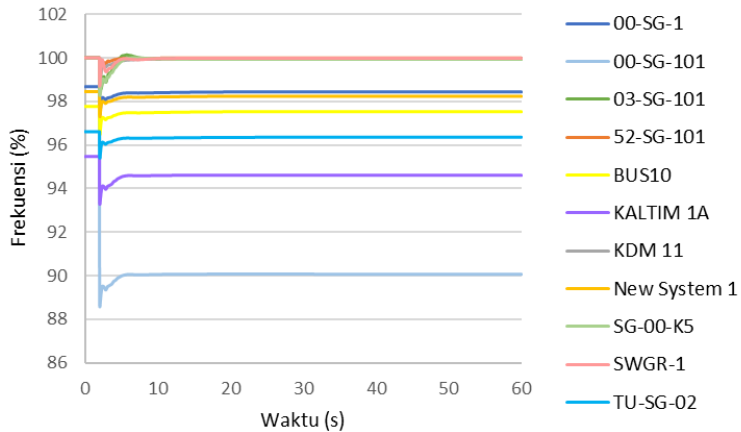
4.3.1.3 Studi Kasus New Gen 1 dan GEN P K-4 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sementara 9 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



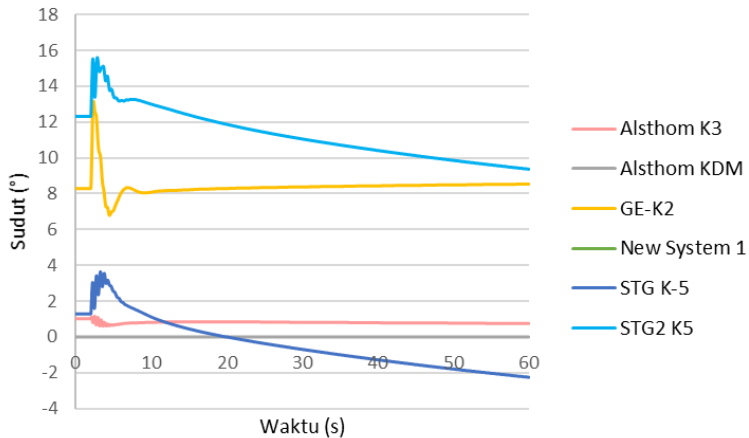
Gambar 4.7 Respon frekuensi saat New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99.03% pada detik ke 33.41. Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya sebesar 34 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99.87% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.8 Respon tegangan saat New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 97.4% dan kembali stabil pada 98.44%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 88,58% dan kembali stabil pada 90.07%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 98.61% dan kembali stabil pada 99.96%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 96.48% dan kembali stabil pada 99.99%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 96.48% dan kembali stabil pada 97.53%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 93.28% dan kembali stabil pada 94.61%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 98.47% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 97.3% dan kembali stabil pada 98.24%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 98.27% dan kembali stabil pada 99.93%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 98.71% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 94.08% dan kembali stabil pada 95.77%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



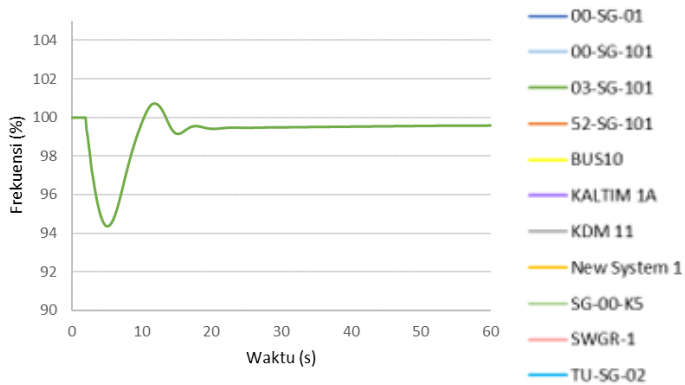
Gambar 4.9 Respon sudut rotor saat New Gen 1 dan GEN P K-4 lepas dari sistem

Gambar 4.9 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika New Gen 1 Mati dan GEN P K-4 lepas pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 1.28° dan kembali stabil pada 0.75° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 6.37° dan kembali stabil pada 8.54° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 5.89° dan kembali stabil pada -2.25° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 6.36° dan kembali stabil pada 9.37° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus New Gen 1 Mati dan GEN P K-4 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

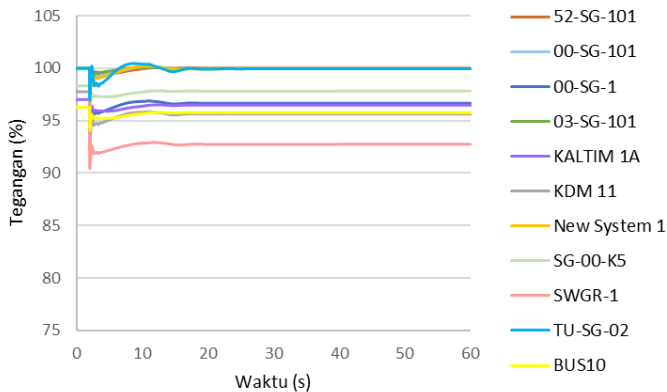
4.3.1.4 Studi Kasus STG-K5 dan STG2 K-5 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sementara 9 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



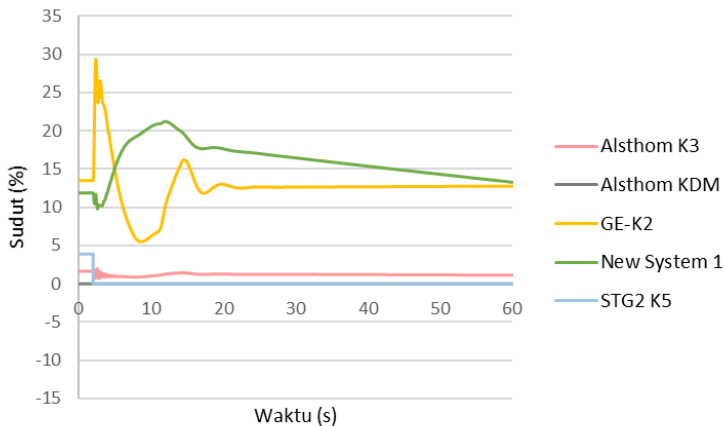
Gambar 4.10 Respon frekuensi saat STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 94.34% pada detik ke 5.041. Penurunan frekuensi terjadi karenasistem kehilangan suplesi daya sebesar 36 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99.59% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.11 Respon tegangan saat STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 98.71% dan kembali stabil pada 100%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 97.55% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 93.83% dan kembali stabil pada 96.66%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 96.76% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 94.71% dan kembali stabil pada 96.48%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 92.77% dan kembali stabil pada 95.63%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 97% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 96.16% dan kembali stabil pada 97.82%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 90.46% dan kembali stabil pada 93.75%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 96.95% dan kembali stabil pada 99.96%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 94.68% dan kembali stabil pada 95.77%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



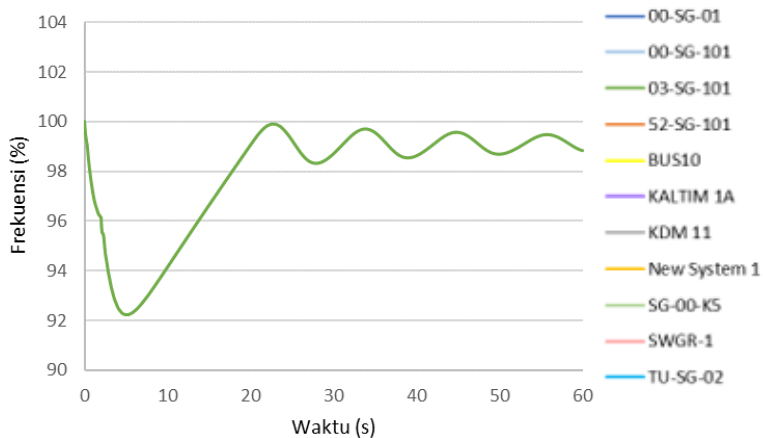
Gambar 4.12 Respon sudut rotor saat STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem

Gambar 4.12 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing- masing generator yang sedang beroperasi ketika STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dari sistem pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alstom K3 mengalami perubahan sudut hingga 1.28° dan kembali stabil pada 1.14° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 23.88° dan kembali stabil pada 12.77° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 7.34° dan kembali stabil pada -0.06° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 11.41° dan kembali stabil pada 13.29° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus STG-K5 dan STG2 K-5 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

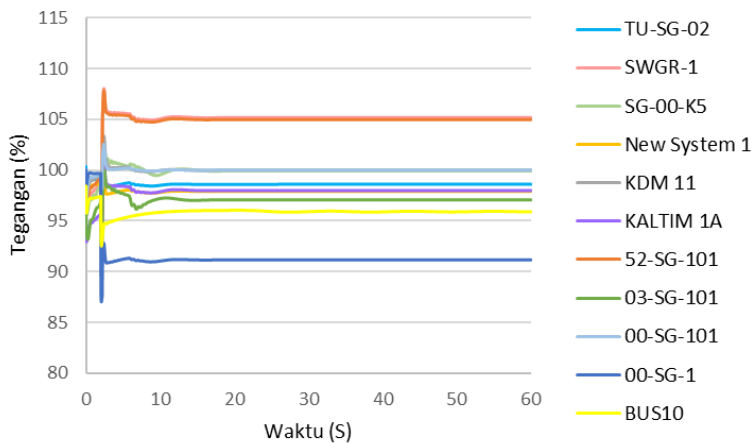
4.3.1.5 Studi Kasus GE-K2 Mati, Alstom K3 Mati dan New Gen 1 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator GE-K2 mati, Alstom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sementara 8 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



Gambar 4.13 Respon frekuensi saat GE-K2 mati, Alstom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem

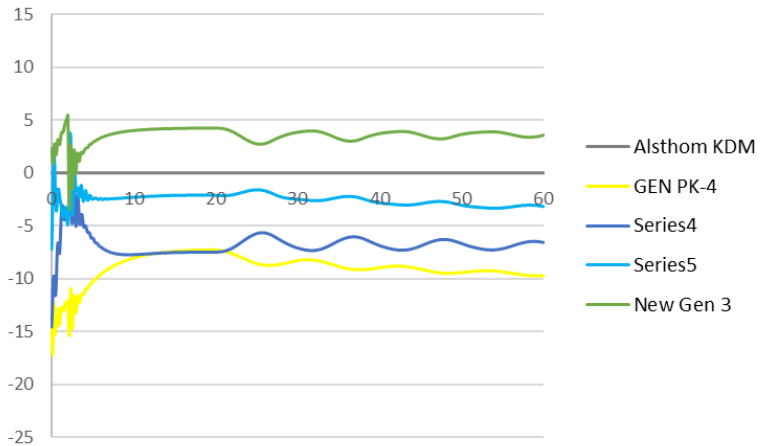
Gambar 4.13 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan dan tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 93.23% pada detik ke 4.921. Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya dari generator GE-K2 dan Alstom K3 yang tidak beroperasi dan lepasnya generator New Gen 1 sebesar 22 MW. Pada waktu akhir simulasi, kondisi sistem tidak mencapai *steady state*. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 respon frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding*.



Gambar 4.14 Respon tegangan saat GE-K2 mati, Alstom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem

Gambar 4.14 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 92.01% dan kembali stabil pada 90.45%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 97.25% dan kembali stabil pada 99.96%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 93.17% dan kembali stabil pada 96.9%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 95.81% dan kembali stabil pada 99.21%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 92.53% dan kembali stabil pada 95.88%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan

tegangan hingga 92.42% dan kembali stabil pada 95.67%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 96.47% dan kembali stabil pada 99.94%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 94.12% dan kembali stabil pada 97.26%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 95.55% dan kembali stabil pada 99.57%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 95.2% dan kembali stabil pada 98.68%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 94.57% dan kembali stabil pada 97.82%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



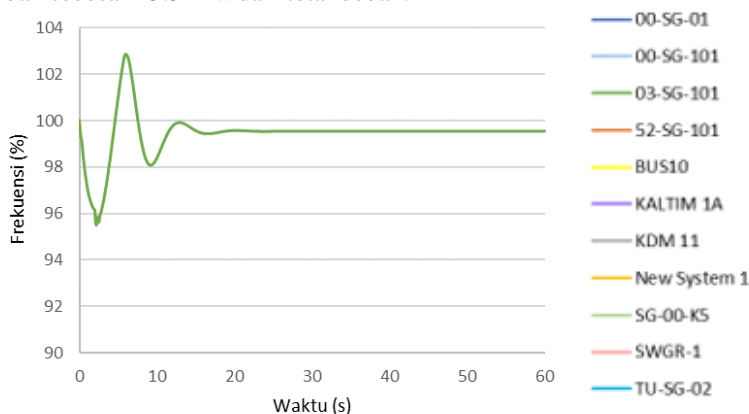
Gambar 4.15 Respon sudut rotor saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem

Gambar 4.15 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Respon sudut rotor pada kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga perlu dilakukan mekanisme load shedding.

Berdasarkan hasil simulasi kasus GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya dengan melihat respon frekuensi, dan sudut rotor, sehingga perlu dilakukan mekanisme *load shedding* agar sistem kembali stabil.

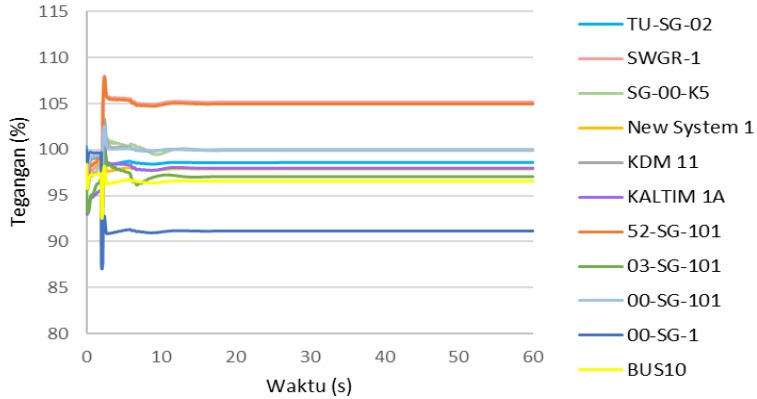
4.3.1.6 Studi Kasus GE-K2 Mati, Alsthom K3 Mati dan New Gen 1 Lepas dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem kelistrikan PT Pupuk Kalimantan Timur diikuti dengan mekanisme *load shedding*. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 25.3 MW dari total beban.



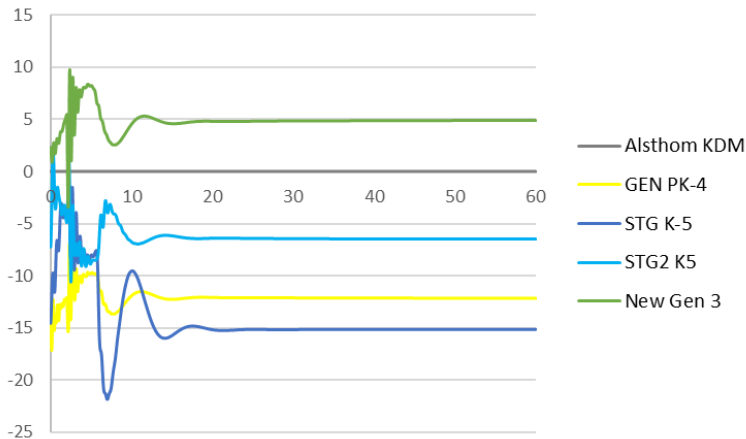
Gambar 4.16 Respon frekuensi saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan *load shedding*

Gambar 4.16 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 95.5% pada detik ke 2.01. Sistem kembali *steady state* pada 99.54% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.17 Respon tegangan saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan *load shedding*

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 87.03% dan kembali stabil pada 91.16%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 97.25% dan kembali stabil pada 99.99%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 93.17% dan kembali stabil pada 97.06%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 95.81% dan kembali stabil pada 105%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 95.77% dan kembali stabil pada 97.06%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 92.42% dan kembali stabil pada 97.99%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 96.47% dan kembali stabil pada 99.99%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 94.12% dan kembali stabil pada 97.91%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 95.55% dan kembali stabil pada 99.91%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 95.2% dan kembali stabil pada 105.2%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 94.57% dan kembali stabil pada 98.6%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



Gambar 4.18 Respon sudut rotor saat GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan *load shedding*

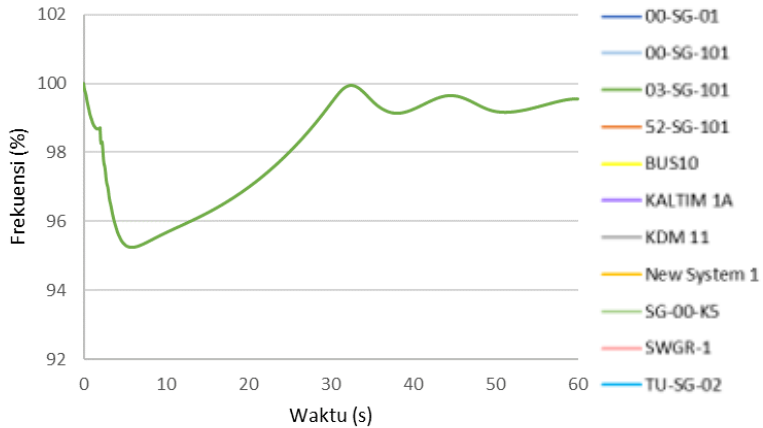
Gambar 4.18 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 10.27° dan kembali stabil pada -12.17° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 21.36° dan kembali stabil pada -15.15° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 12.44° dan kembali stabil pada -6.48° . Generator New Gen 3 mengalami perubahan sudut hingga 13.21° dan kembali stabil pada 4.21° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus Generator GE-K2 mati, Alsthom K3 mati dan New Gen 1 lepas dari sistem dengan *load shedding* dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem dapat kembali stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

4.3.1.7 Studi Kasus GE-K2 Mati, New Gen 1 Mati dan New Gen 2 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

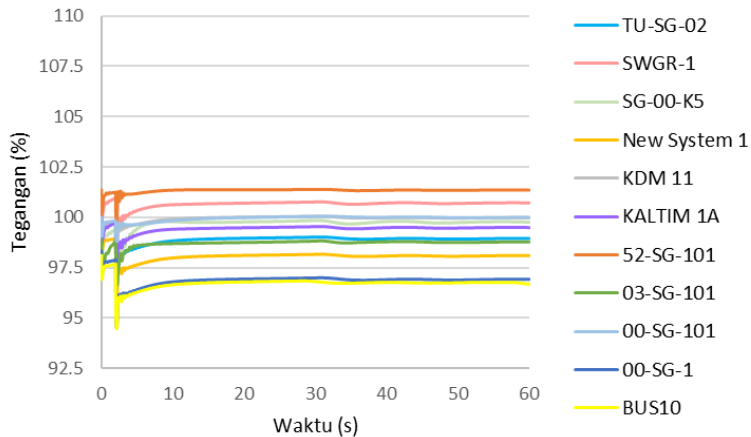
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur

sementara 8 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



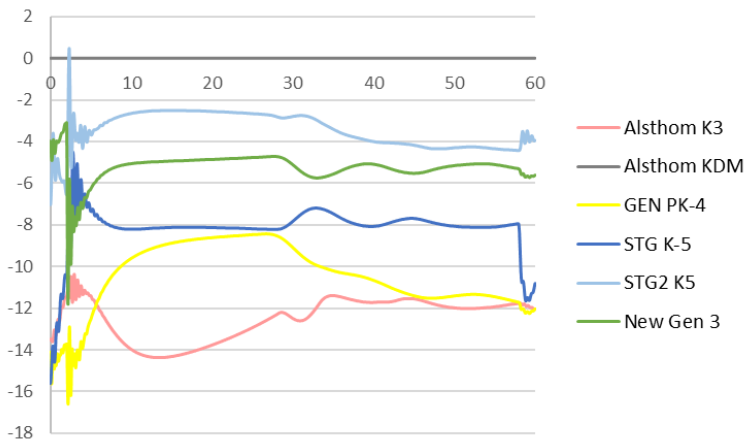
Gambar 4.19 Respon frekuensi saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan dan tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya dari generator GE-K2 dan New Gen 1 yang tidak beroperasi dan lepasnya generator New Gen 2 sebesar 22 MW. Pada waktu akhir simulasi, kondisi sistem tidak mencapai *steady state*. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 respon frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding*.



Gambar 4.20 Respon tegangan saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem

Gambar 4.20 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami osilasi sesaat setelah terjadinya gangguan pada sistem berupa generator GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas. Respon tegangan pada kasus ini diperbolehkan. Untuk itu, diperlukan mekanisme *load shedding* agar tegangan dapat kembali stabil.



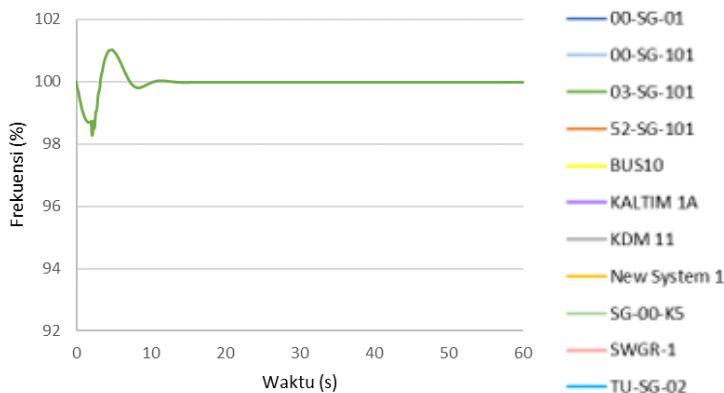
Gambar 4.21 Respon Sudut rotor saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem

Gambar 4.21 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Respon sudut rotor pada kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga perlu dilakukan mekanisme load shedding.

Berdasarkan hasil simulasi kasus GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor, sehingga perlu dilakukan mekanisme load shedding agar sistem kembali stabil.

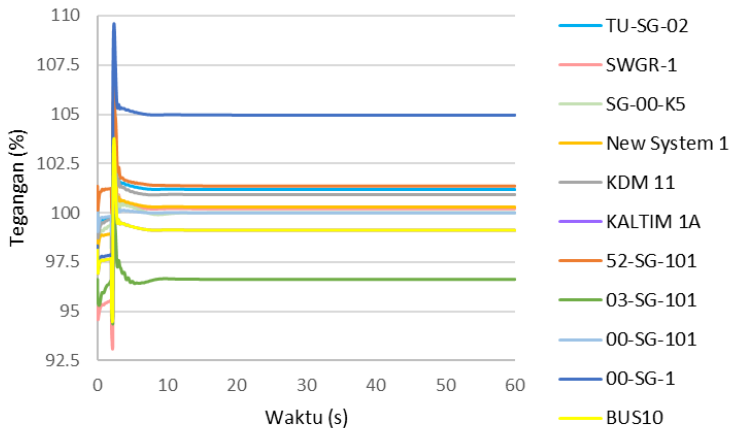
4.3.1.8 Studi Kasus GE-K2 Mati, New Gen 1 Mati dan New Gen 2 trip dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan dilakukan pelepasan beban sebesar 27.7 MW dari total sistem



Gambar 4.22 Respon frekuensi saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem dengan *load shedding*

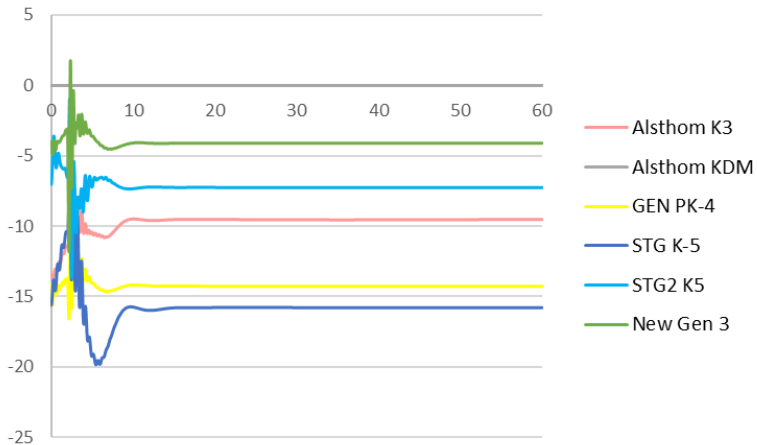
Gambar 4.22 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98.27% pada detik ke 2.121 Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya sebesar 98.26%. Sistem kembali *steady state* pada 99.99% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.23 Respon tegangan saat GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem dengan *load shedding*

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 94.49% dan kembali stabil pada 105%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 98.81% dan kembali stabil pada 100%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 98.9% dan kembali stabil pada 99.97%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 94.37% dan kembali stabil pada 96.63%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 97.26% dan kembali stabil pada 100.8%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 94.48% dan kembali stabil pada 99.12%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 97.22% dan kembali stabil pada 100.9%. Bus

New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 95`94% dan kembali stabil pada 100.3%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 97.26% dan kembali stabil pada 100%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 93.09% dan kembali stabil pada 100.2%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 96.76% dan kembali stabil pada 101.2%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



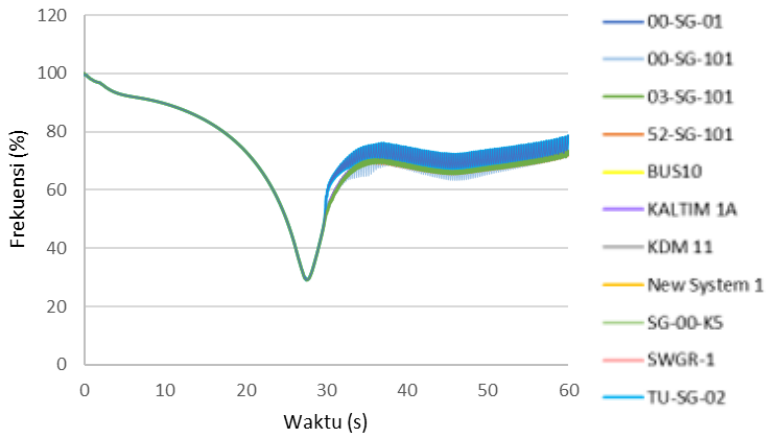
Gambar 4.24 Respon sudut rotor saat Generator GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dari sistem dengan *load shedding*

Gambar 4.24 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alstom K3 mengalami perubahan sudut hingga 6° dan kembali stabil pada -9.2°. Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 8.14° dan kembali stabil pada -14.28°. Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 13.2° dan kembali stabil pada -15.79°. Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 12.72° dan kembali stabil pada -7.26°. Generator New Gen 3 mengalami perubahan sudut hingga 13.57° dan kembali stabil pada -4.1°.

Berdasarkan hasil simulasi kasus GE-K2 mati, New Gen 1 mati dan New Gen 2 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem dapat kembali stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

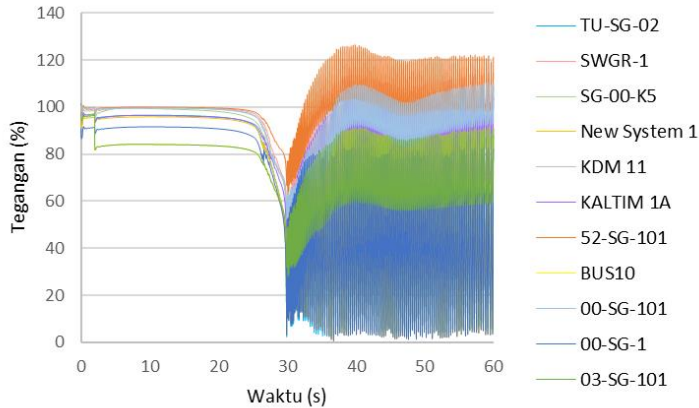
4.3.1.9 Studi Kasus New Gen 1 Mati, New Gen 2 Mati dan GEN P K-4 Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur sementara 8 generator lainnya beroperasi. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



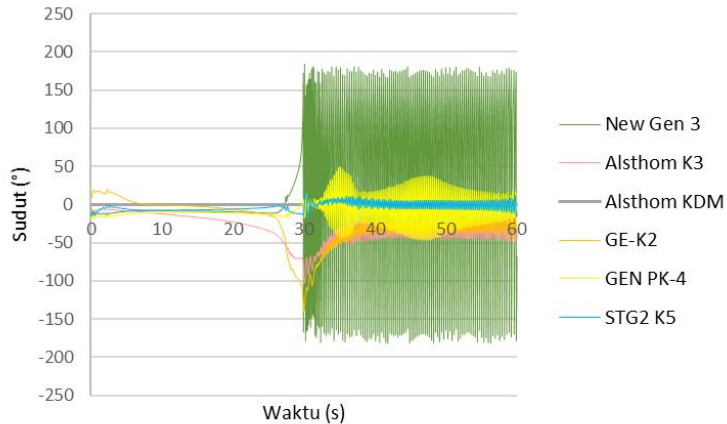
Gambar 4.25 Respon frekuensi saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem

Gambar 4.25 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan dan tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terjadi karena sistem kehilangan suplai daya dari generator New Gen 1 dan New Gen 2 yang tidak beroperasi dan lepasnya generator GEN P K-4 sebesar 13 MW. Pada waktu akhir simulasi, kondisi sistem tidak mencapai *steady state*. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 respon frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding*.



Gambar 4.26 Respon tegangan saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami osilasi sesaat setelah terjadinya gangguan pada sistem berupa generator New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas. Respon tegangan pada kasus ini diperbolehkan. Untuk itu, diperlukan mekanisme *load shedding* agar tegangan dapat kembali stabil.



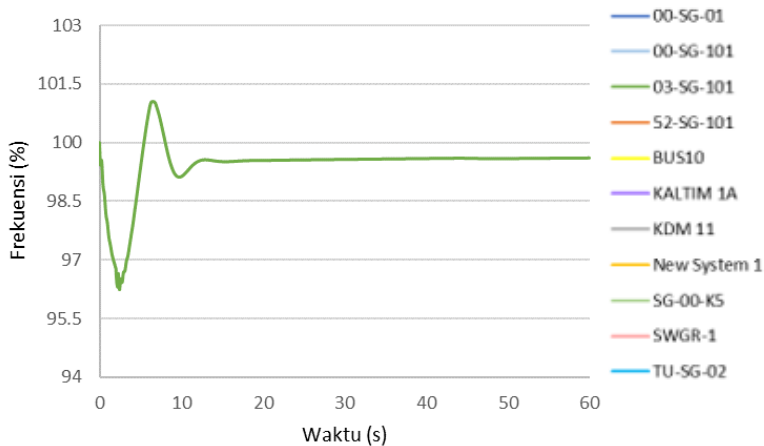
Gambar 4.27 Respon sudut rotor saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem

Gambar 4.27 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas pada detik ke 2. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Respon sudut rotor pada kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga perlu dilakukan mekanisme *load shedding*.

Berdasarkan hasil simulasi kasus New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor, sehingga perlu dilakukan mekanisme *load shedding* agar sistem kembali stabil.

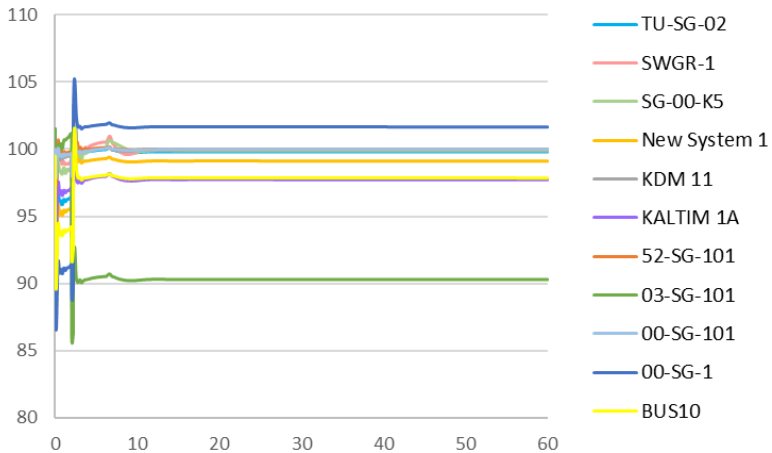
4.3.1.10 Studi Kasus New Gen 1 Mati, New Gen 2 Mati dan GEN P K-4 Lepas dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem kelistrikan PT Pupuk Kalimantan Timur diikuti dengan mekanisme *load shedding*. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 32.175 MW dari total beban.



Gambar 4.28 Respon frekuensi saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem dengan *load shedding*

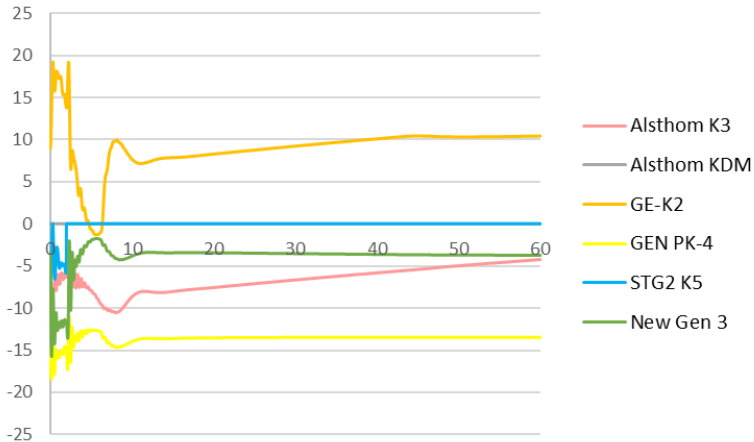
Gambar 4.28 menunjukkan bahwa frekuensi pada masing-masing bus mengalami penurunan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 96.24% pada detik ke 2.421. Sistem kembali *steady state* pada 99.61% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.29 Respon tegangan saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem dengan *load shedding*

Gambar 4.29 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2. Penurunan tegangan terjadi karena beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 86.55% dan kembali stabil pada 101.7%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 97.82% dan kembali stabil pada 99.99%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 85.56% dan kembali stabil pada 90.3%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 97.22% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 89.57% dan kembali stabil pada 97.85%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 93.55% dan kembali stabil pada 97.73%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 97.17% dan kembali stabil pada 99.99%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 91.33% dan kembali stabil pada 99.11%. Bus SG-00-K5 mengalami

penurunan tegangan hingga 95.99% dan kembali stabil pada 99.88%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 96.85% dan kembali stabil pada 99.98%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 92.01% dan kembali stabil pada 99.81%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



Gambar 4.30 Respon sudut rotor saat New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas dari sistem dengan *load shedding*

Gambar 4.30 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alstom K3 mengalami perubahan sudut hingga 6.32° dan kembali stabil pada -4.23° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 20.52° dan kembali stabil pada 10.43° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 7.54° dan kembali stabil pada -13.47° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 17.18° dan kembali stabil pada -14.65° . Generator New Gen 3 mengalami perubahan sudut hingga 13.98° dan kembali stabil pada -3.74° .

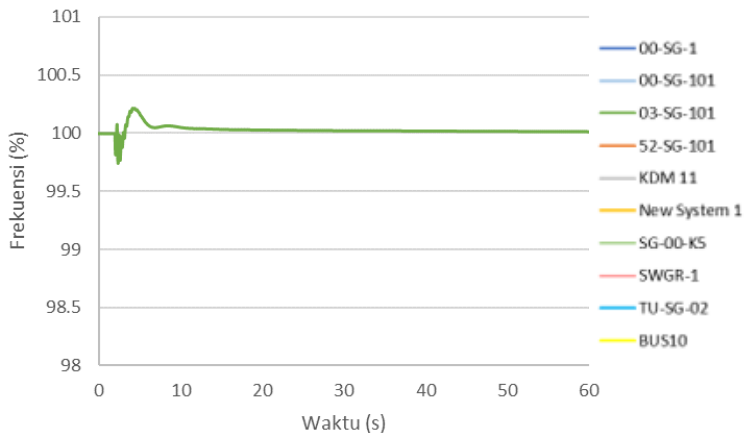
Berdasarkan hasil simulasi kasus New Gen 1 mati, New Gen 2 mati dan GEN P K-4 lepas diikuti dengan mekanisme *load shedding* dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem dapat kembali stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

4.3.2. Simulasi Kestabilan Transien *Short Circuit*

Pada sub bab 4.3.2. akan dilakukan simulasi kestabilan transien untuk studi kasus ketika terjadi *short circuit* pada masing-masing bus pada level tegangan yang berbeda.

4.3.2.1 Studi Kasus *Short Circuit* di Bus KALTIM 1A 6.6 kV ($t=2$ s)

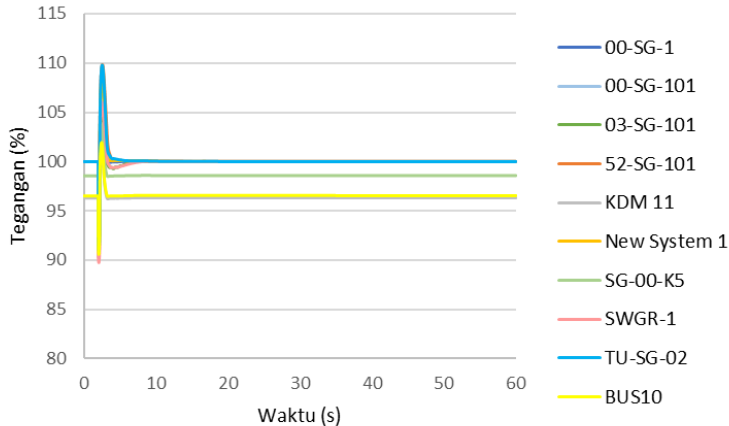
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat terjadi hubung singkat pada bus KALTIM 1A dengan rating tegangan 6.6 kV *Circuit breaker* CB5 *open* untuk mengatasi gangguan. CB *open* pada detik ke 0.3 (0.1 detik *setting relay* dan 0.2 *sensing* dan *open* CB) Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Total waktu pada simuasi kasus ini adalah 60 detik.



Gambar 4.31 Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus KALTIM 1A

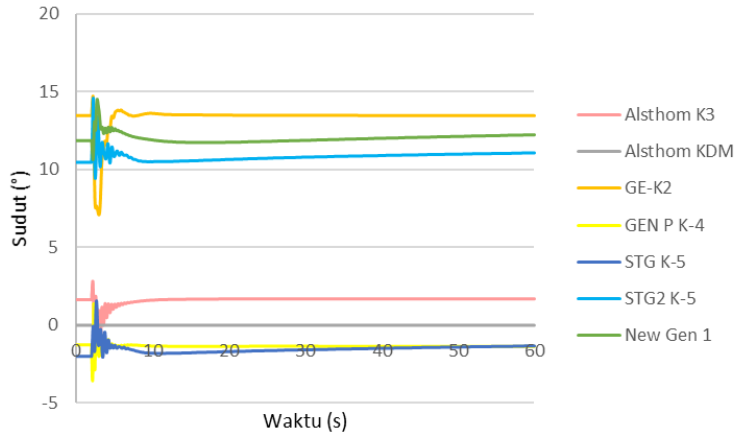
Gambar 4.31 menunjukkan frekuensi pada masing-masing bus pada saat hubung singkat di bus KALTIM 1A diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa masing-masing bus mengalami penurunan tegangan namun sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99.74% pada detik ke 2.381. Sistem kembali *steady state* pada 100.016 dari frekuensi

normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.32 Respon tegangansaat terjadi hubung singkat di bus KALTIM 1A

Gambar 4.32 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2 ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus KALTIM 1A diikuti dengan CB open pada $t = 0.3$ detik. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 96.48% dan kembali stabil pada 100%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 92.85% dan kembali stabil pada 100%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 92.11% dan kembali stabil pada 100%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 91.78% dan kembali stabil pada 100%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 90.21% dan kembali stabil pada 96.32%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 91.89% dan kembali stabil pada 100%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 92.94% dan kembali stabil pada 98.58%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 89.75% dan kembali stabil pada 100%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 90.96% dan kembali stabil pada 100%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 90.6% dan kembali stabil pada 96.55%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



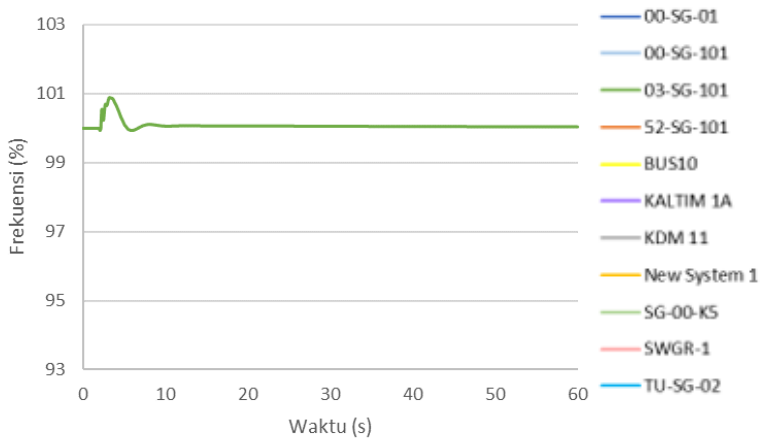
Gambar 4.33 Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus KALTIM 1A

Gambar 4.33 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika terjadi hubung singkat di bus KALTIM 1A pada detik ke 2 diikuti *CB open* pada $t = 0.3$ detik. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 4.02° dan kembali stabil pada 1.70° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 7.63° dan kembali stabil pada 13.47° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 4.96° dan kembali stabil pada 13.47° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 4.96° dan kembali stabil pada -1.36° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 3.62° dan kembali stabil pada -1.33 . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 5.16° dan kembali stabil pada 11.08° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus *short circuit* pada bus KALTIM 1A dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

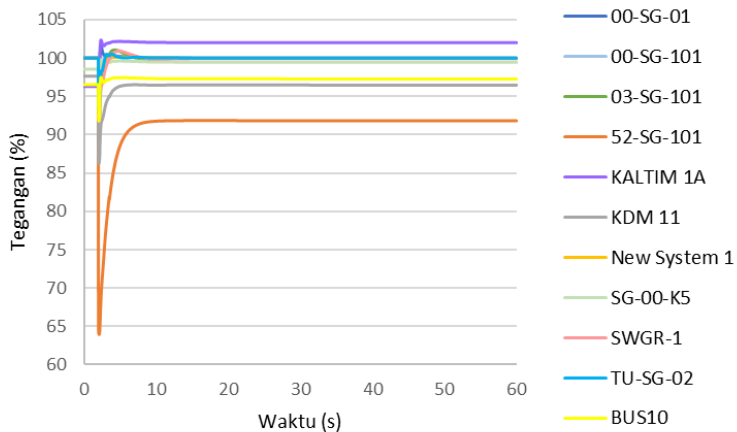
4.3.2.2 Studi Kasus Short Circuit di Bus 52-SG-411 6.9 kV ($t=2$ s)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat terjadi hubung singkat pada bus 52-SG-411 dengan rating tegangan 6.9 kV. *Circuit breaker* CB52 *open* untuk mengatasi gangguan. CB *open* pada detik ke 0.3 (0.1 detik *setting relay* dan 0.2 *sensing* dan *open* CB) Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Total waktu pada simuasi kasus ini adalah 60 detik.



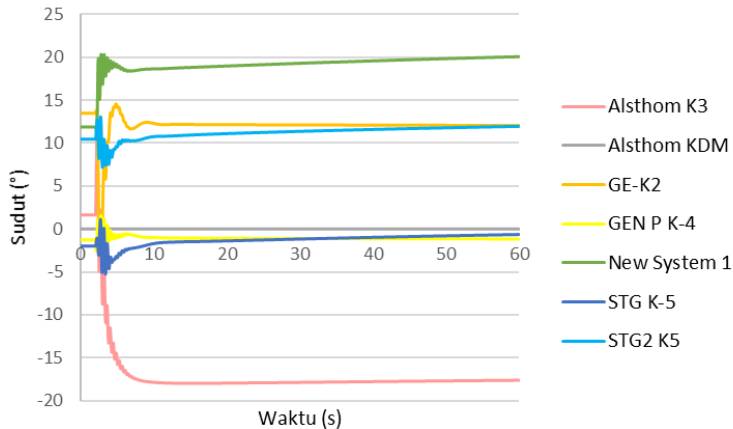
Gambar 4.34 Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411

Gambar 4.34 menunjukkan frekuensi pada masing-masing bus pada saat hubung singkat di bus 52-SG-411 diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa masing-masing bus mengalami penurunan tegangan namun sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99.93% pada detik ke 2.081. Sistem kembali *steady state* pada 100% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.35 Respon tegangan saat terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411

Gambar 4.35 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2 ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus 52-SG-411. Diikuti dengan CB open pada $t = 0,3$ detik. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 97.21% dan kembali stabil pada 100% Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 94.27% dan kembali stabil pada 100% Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 93.71% dan kembali stabil pada 99.97% Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 63.95% dan kembali stabil pada 91.82% Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 91.43% dan kembali stabil pada 102%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 86.27% dan kembali stabil pada 96.48% Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 93.51 % dan kembali stabil pada 99.99% Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 94.06% dan kembali stabil pada 99.46% Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 91.77% dan kembali stabil pada 99.92% Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 92.75% dan kembali stabil pada 99.99% Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 91.78% dan kembali stabil pada 97.28% Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



Gambar 4.36 Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411

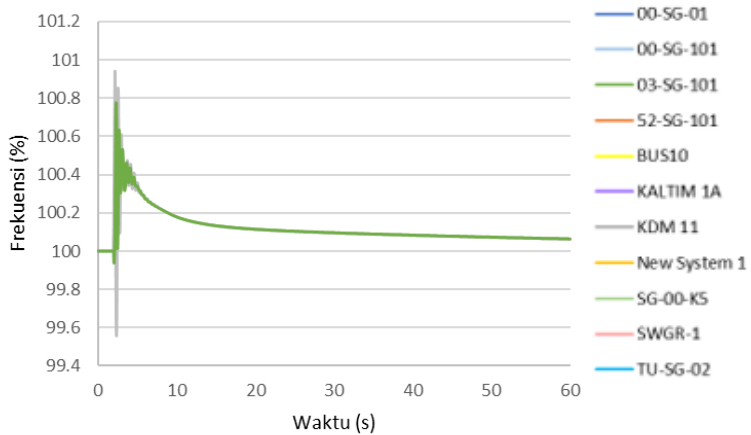
Gambar 4.36 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika terjadi hubung singkat di bus 52-SG-411 pada detik ke 2 diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 30° dan kembali stabil pada -17.61° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 17.34° , dan kembali stabil pada Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 12.06° dan kembali stabil pada 4.16° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 9.09° dan kembali stabil pada 20.06° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 6.35° dan kembali stabil pada -0.64° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 5.85° dan kembali stabil pada 11.95° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus *short circuit* pada bus 52-SG-411 dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

4.3.2.3 Studi Kasus Short Circuit di Bus 11 kV ($t=2$ s)

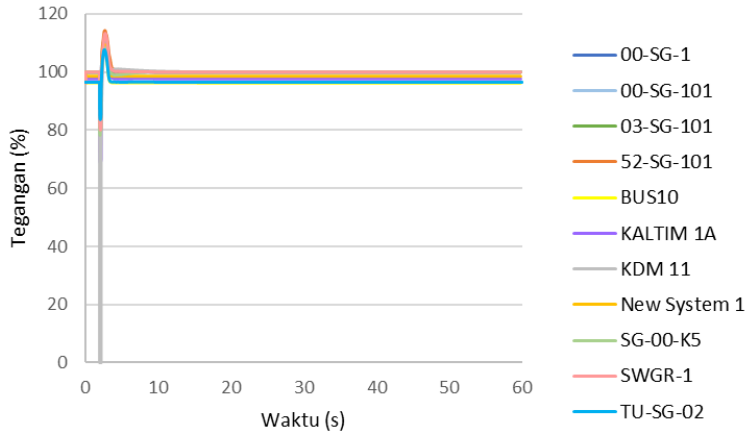
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat terjadi hubung singkat pada bus BUS1 dengan rating tegangan 11 kV. *Circuit breaker* LS POPKA 0 *open* untuk

mengatasi gangguan. *CB open* pada detik ke 0.3 (0.1 detik *setting relay* dan 0.2 *sensing* dan *open CB*) Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Total waktu pada simulasi kasus ini adalah 60 detik.



Gambar 4.37 Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus BUS1

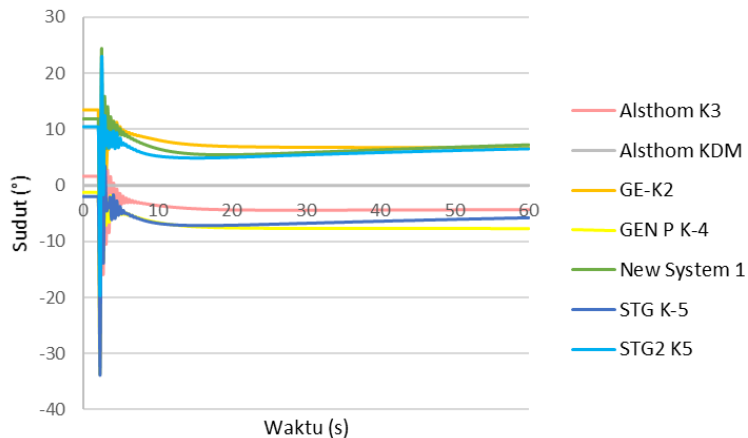
Gambar 4.37 menunjukkan frekuensi pada masing-masing bus pada saat hubung singkat di bus BUS1 diikuti *CB open* pada $t = 0.3$ detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa masing-masing bus mengalami penurunan tegangan namun sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99.55% pada detik ke 2.041. Sistem kembali *steady state* pada 100.1% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.38 Respon tegangansaat terjadi hubung singkat di bus BUS1

Gambar 4.38 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2 ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus BUS1 diikuti dengan CB open pada $t = 0.3$ detik. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 92.23% dan kembali stabil pada 100%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 84.33% dan kembali stabil pada 100%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 83.84% dan kembali stabil pada 100%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 82.4% dan kembali stabil pada 100%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 83% dan kembali stabil pada 96.29%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 69.09% dan kembali stabil pada 97.65%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 0% dan kembali stabil pada 100%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 86.35% dan kembali stabil pada 98.56%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 78.31% dan kembali stabil pada 100%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 80.11% dan kembali stabil pada 100%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 83.68% dan kembali stabil pada 96.53%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan. Namun, terdapat bus yang mengalami penurunan tegangan hingga kurang dari 60%, hal ini dapat mengakibatkan kontraktor pada bus yang bersangkutan *trip*. Untuk itu,

diperlukan pengaturan rele *undervoltage* agar saat terjadi gangguan kontinuitas pelayanan daya dapat tetap dijaga.



Gambar 4.39 Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus BUS1

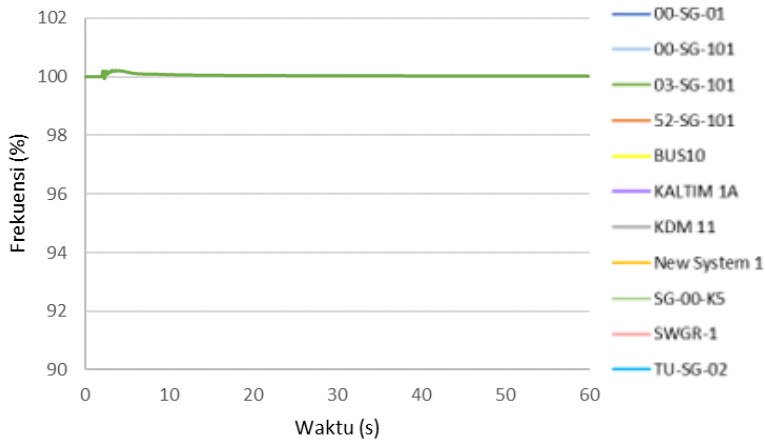
Gambar 4.39 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika terjadi hubung singkat di bus BUS1 pada detik ke 2 diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 45.56° dan kembali stabil pada -4.32° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 41.21° dan kembali stabil pada 6.73° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 40.58° dan kembali stabil pada -7.7° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 40.58° dan kembali stabil pada 7.23° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 48.19° dan kembali stabil pada -5.77° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 42.73° dan kembali stabil pada 6.54° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus *short circuit* pada bus BUS1 dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

4.3.2.4 Studi Kasus Short Circuit di Bus TU-SG-02 20 kV ($t=2$ s)

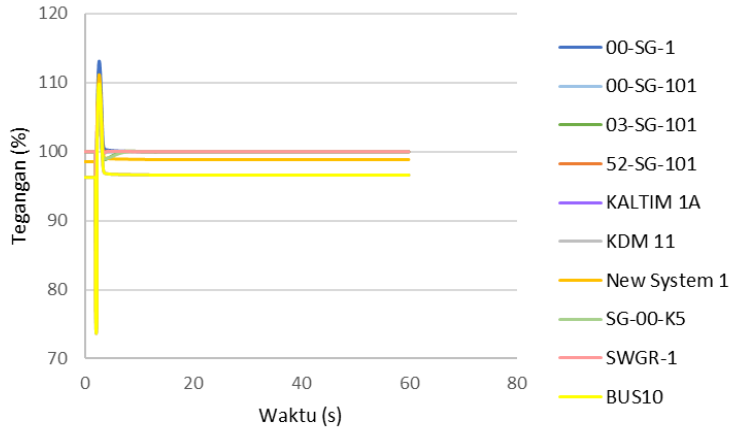
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat terjadi hubung singkat pada bus TU-SG-02

dengan rating tegangan 20 kV. *Circuit breaker* CB14-1 *open* untuk mengatasi gangguan. CB *open* pada detik ke 0.3 (0.1 detik *setting relay* dan 0.2 *sensing* dan *open* CB) Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Total waktu pada simuasi kasus ini adalah 60 detik.



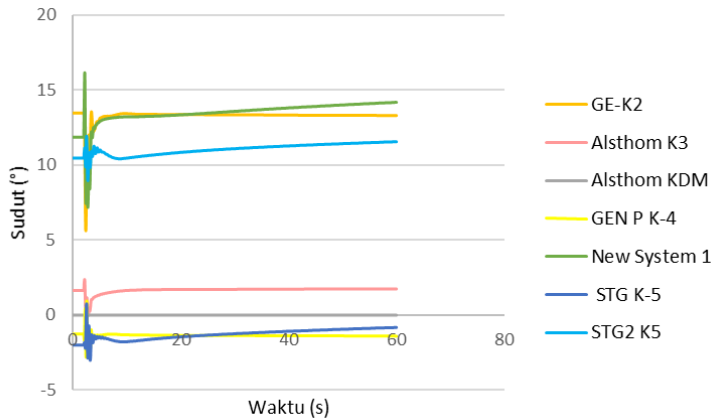
Gambar 4.40 Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02

Gambar 4.40 menunjukkan frekuensi pada masing-masing bus pada saat hubung singkat di bus TU-SG-02 diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa masing-masing bus mengalami penurunan tegangan namun sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99.94% pada detik ke 2.301. Sistem kembali *steady state* pada 100% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.41 Respon tegangansaat terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02

Gambar 4.41 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2 ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus TU-SG-02 diikuti dengan CB open pada $t = 0.3$ detik. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 84.82% dan kembali stabil pada 100%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 95.19% dan kembali stabil pada 100%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 94.78% dan kembali stabil pada 100%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 94.57% dan kembali stabil pada 100%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 73.67% dan kembali stabil pada 96.62%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 73.67%, dan kembali stabil pada 96.62%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 94.57% dan kembali stabil pada 100%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 75.14% dan kembali stabil pada 98.86%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 93.08% dan kembali stabil pada 100%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 93.87% dan kembali stabil pada 100%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan.



Gambar 4.42 Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02

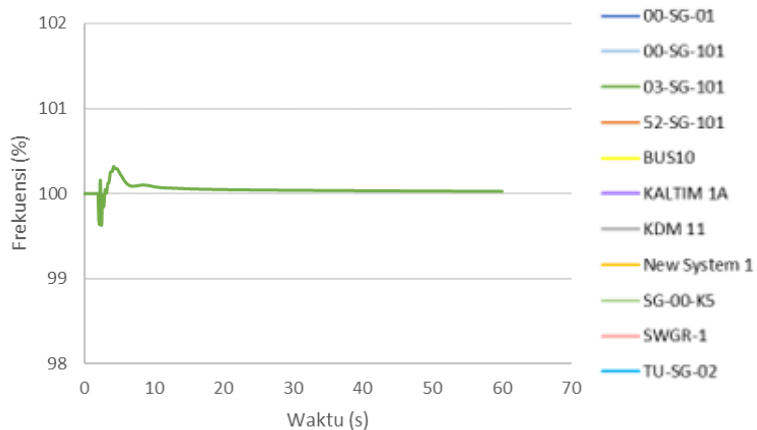
Gambar 4.42 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika terjadi hubung singkat di bus TU-SG-02 pada detik ke 2 diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 2.42° dan kembali stabil pada 1.75° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 7.93° dan kembali stabil pada 13.31° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 3.75° dan kembali stabil pada -1.4° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 8.98° dan kembali stabil pada 14.19° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 3.77° dan kembali stabil pada -0.82° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 2.97° dan kembali stabil pada 11.56° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus short circuit TU-SG-02 dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

4.3.2.5 Studi Kasus Short Circuit di Bus RING 33 33 kV ($t=2$ s)

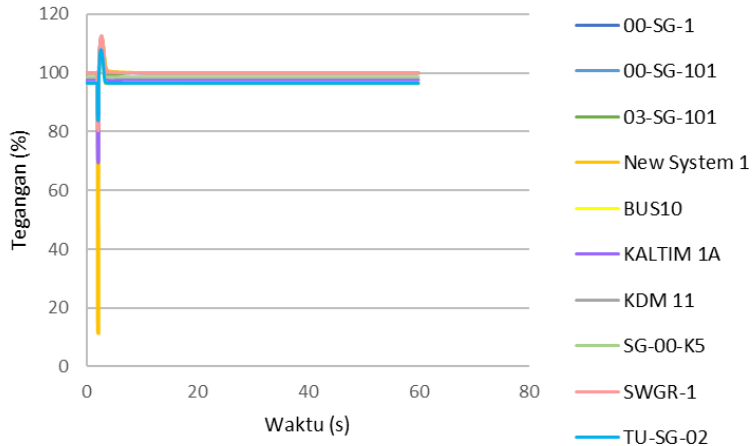
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisis kestabilan transien saat terjadi hubung singkat pada bus RING 33 dengan rating tegangan 33 kV. *Circuit breaker* CB63 *open* untuk mengatasi

gangguan. *CB open* pada detik ke 0.3 (01. detik *setting relay* dan 0.2 *sensing* dan *open CB*) Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Total waktu pada simulasi kasus ini adalah 60 detik.



Gambar 4.43 Respon frekuensi saat terjadi hubung singkat di bus RING 33

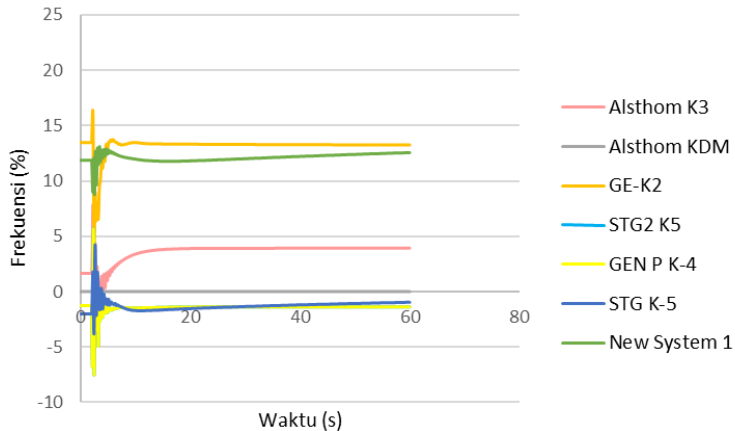
Gambar 4.43 menunjukkan frekuensi pada masing-masing bus pada saat hubung singkat di bus RING 33 diikuti *CB open* pada $t = 0.3$ detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa masing-masing bus mengalami penurunan tegangan namun sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99.63% pada detik ke 2.481. Sistem kembali *steady state* pada 100% dari frekuensi normal. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.44 Respon tegangan saat terjadi hubung singkat di bus RING 33

Gambar 4.44 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan pada detik ke 2 ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus RING 33 diikuti dengan CB open pada $t = 0.3$ detik. Bus 00-SG-1 mengalami penurunan tegangan hingga 92.3% dan kembali stabil pada 100%. Bus 00-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 84.54% dan kembali stabil pada 100%. Bus 03-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 83.29% dan kembali stabil pada 100%. Bus 52-SG-101 mengalami penurunan tegangan hingga 11.31% dan kembali stabil pada 100%. Bus BUS10 mengalami penurunan tegangan hingga 83.14% dan kembali stabil pada 96.3%. Bus KALTIM 1A mengalami penurunan tegangan hingga 69.39% dan kembali stabil pada 97.65%. Bus KDM 11 mengalami penurunan tegangan hingga 82.53% dan kembali stabil pada 100%. Bus New system 1 mengalami penurunan tegangan hingga 86.49% dan kembali stabil pada 98.56%. Bus SG-00-K5 mengalami penurunan tegangan hingga 78.17% dan kembali stabil pada 100%. Bus SWGR-1 mengalami penurunan tegangan hingga 80.37% dan kembali stabil pada 100%. Bus TU-SG-02 mengalami penurunan tegangan hingga 83.79% dan kembali stabil pada 96.53%. Kondisi dari semua bus masih berada dalam *range* yang diperbolehkan. Namun, terdapat bus yang mengalami penurunan tegangan hingga kurang dari 60%, hal ini dapat mengakibatkan kontraktor pada bus yang bersangkutan

trip. Untuk itu, diperlukan pengaturan rele *undervoltage* agar saat terjadi gangguan kontinuitas pelayanan daya dapat tetap dijaga.



Gambar 4.45 Respon sudut rotor saat terjadi hubung singkat di bus RING 33

Gambar 4.45 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator yang sedang beroperasi ketika terjadi hubung singkat di bus RING 33 pada detik ke 2 diikuti CB *open* pada $t = 0.3$ detik. Terjadi osilasi dari masing-masing generator. Generator Alsthom K3 mengalami perubahan sudut hingga 13.86° dan kembali stabil pada 3.94° . Generator GE-K2 mengalami perubahan sudut hingga 12.34° dan kembali stabil pada 13.26° . Generator GEN P K-4 mengalami perubahan sudut hingga 13.2° dan kembali stabil pada -1.38° . Generator New Gen 1 mengalami perubahan sudut hingga 4.34° dan kembali stabil pada 12.56° . Generator STG K-5 mengalami perubahan sudut hingga 8.06° dan kembali stabil pada -0.96° . Generator STG2 K5 mengalami perubahan sudut hingga 13.54° dan kembali stabil pada 11.45° .

Berdasarkan hasil simulasi kasus *short circuit* pada bus RING 33 dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem masih dalam keadaan stabil dengan melihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Dari 7 kasus lepasnya pembangkit, 4 diantaranya tidak menyebabkan kondisi sistem kelistrikan yang berbahaya, yaitu ketika terdapat satu hingga dua pembangkit lepas dari sistem. Respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor masih dalam standar yang diperbolehkan.
- b) Dari 7 kasus lepasnya pembangkit, 3 diantaranya dapat menyebabkan kondisi sistem kelistrikan yang berbahaya, yaitu ketika terdapat satu pembangkit lepas dengan kondisi dua pembangkit lainnya tidak beroperasi. Gangguan ini menyebabkan respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor terus mengalami osilasi dan tidak mencapai kondisi *steady state* sehingga perlu dilakukan mekanisme pelepasan beban.
- c) Pada kasus hubung singkat didapatkan bahwa ketika terjadi kasus *SC* 6.6 kV, *SC* 6.9 kV dan , *SC* 20 kV sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Sementara itu, pada kasus *SC* 11 kV dan *SC* 33 kV terjadi penurunan tegangan minimum hingga kurang dari 60%, hal ini perlu diwaspadai karena dapat membahayakan peralatan pabrik pada sistem meskipun respon tegangan, frekuensi, dan sudut rotor dapat kembali stabil dalam batas standar yang diperbolehkan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan analisis adalah sebagai berikut :

- a) Pada kasus satu pembangkit lepas dengan kondisi dua pembangkit lainnya tidak beroperasi, masing-masing membutuhkan mekanisme *load shedding*. Untuk kasus GE-K2 *off*, Alstom K3 *off* dan New Gen 1 *trip* membutuhkan *load shedding* sekitar 25.3 MW. Untuk kasus GE-K2 *off*, New Gen 1 *off* dan New Gen 2 *trip* membutuhkan *load shedding* sekitar 27.7 MW. Untuk kasus New Gen 1 *off*, New Gen 2 *off* dan GEN P K-4 *trip* membutuhkan *load shedding* sekitar 32.175 MW.

- b) Dalam melakukan perancangan pelepasan beban, sebaiknya beban yang dilepas adalah beban yang berada di dekat generator yang mengalami kasus *outage*.
- c) Untuk kasus hubung singkat, sebaiknya bus-bus yang mengalami penurunan tegangan cukup besar diberikan rele *undervoltage* dengan waktu *delay* minimal sebesar total durasi waktu saat tegangan bus kurang dari 90%.
- d) Untuk kasus hubung singkat *SC* 11 kV, dan *SC* 33 kV, sebaiknya lebih diperhatikan nilai dari kedip tegangan (*voltage sag*) karena dapat mempengaruhi kerja dari peralatan-peralatan elektronik atau peralatan kontrol dalam pabrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE, “*Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*”, 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987).
- [2] Stevenson, W.D., Jr and Genger, J.J., “*Elements o Power System Analysis, 4th Edition*”. McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [3] Das, J.C., “*Transient in Electrical Systems, Analysis ,Recognition, and Mitigation*“, McGraw-Hill Companies Inc, Ch. 12, 2010.
- [4] IEEE, “*Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*”, 1987. IEEE Std C37.106-1987.
- [5] Hafidz, Isa, “Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di Project Pakistan Deep Water Container Port”, Bab. 2, 2014.
- [6] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*”, IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [7] Marsudi, Djiteng, “Operasi Sistem Tenaga Listrik”, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [8] Kundur, Prabha, “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill Compnies Inc, 1994.
- [9] Rakhadiman, Hilman., “Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di PT. Pupuk Kalimantan Timur Pabrik 5 (PKT-5)”, 2013.
- [10] Aji, Waskito, “Analisis Kestabilan Transien di PT. PUSRI Akibat Penambahan Pmebangkit 35 MW dan Pabrik P2-B Menggunakan Sistem Synchronizing Bus 33 Kv”, 2014.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



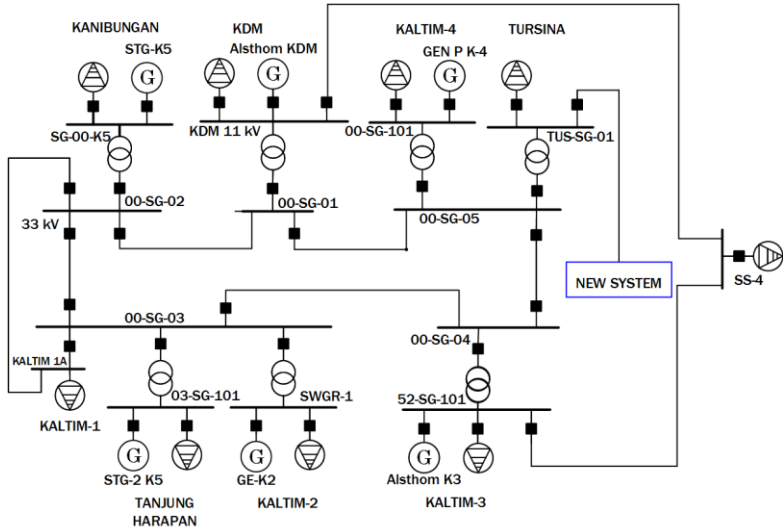
Aidatul Khoiriatis, dilahirkan di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur pada 21 tahun yang lalu tepatnya tanggal 28 Desember. Penulis merupakan putri pertama dari dua bersaudara. Putri dari pasangan Mokhammad Zainukhi dan Siti Masuda ini memulai jenjang pendidikan di TK Islam Bhakti Lumajang, SD Negeri Tompokersan 1 Lumajang, SMP Negeri 1 Lumajang, dan SMA Negeri 2 Lumajang hingga lulus pada tahun 2013. Pada tahun

2013 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SBMPTN. Selama kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa sebagai bendahara HIMATEKTRO ITS 2014/2015 dan 2015/2016. Penulis aktif dalam kegiatan pelatihan (seperti LKMM PRA-TD, LKMM TD, dan PJTD). Selanjutnya, penulis juga aktif dalam kepanitiaan (seperti ELECTRA, EE EVENT, dan GERIGI). Selain itu, penulis juga aktif mengikuti kompetisi keilmiahan (seperti PKM dan kompetisi yang dinaungi INNOPA). Penulis dapat dihubungi melalui email aidatulkhoiriatis@gmail.com.

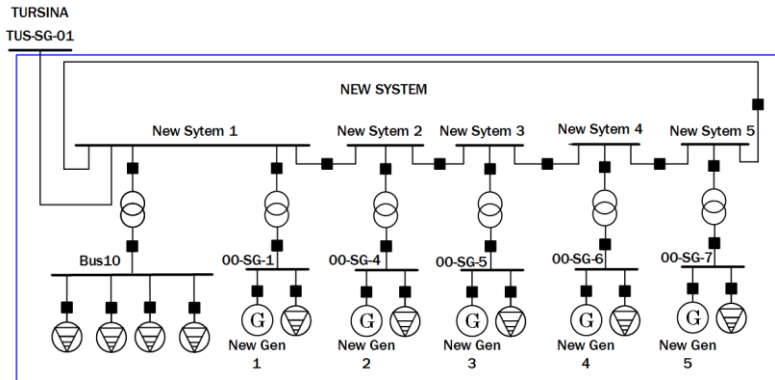
Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

LAMPIRAN

SLD PT. Pupuk Kalimantan Timur



SLD Plant Tambahan (New System)



Setting Governor

Type : 2301

Generator : STG K-5

11 kV 30 MW Voltage Control

☒ Built-in ☐ UDM

Type Mode LS GP#
2301 Droop None

Sample Data

Droop Pmax Pmin thetaMax thetaMin
5 31.579 0 42 0

alpha beta rho K1
0.8273 0.165 0.2 271.6

tau T1 T2
0.1 0.025 0.01

Type : ST

Generator : STG-K5

11 kV 30 MW Voltage Control

☒ Built-in ☐ UDM

Type Mode
ST Droop

Sample Data

Droop Pmax Pmin
5 31.579 0

Fhp
0.7

Tsr Tc Tch Trh
0.1 0.1 0.15 5

Tipe : GGOV3

Generator : Alsthom KDM, Alsthom K3, GE-K2 dan GEN P K-4

11 kV 21.6 MW Voltage Control							
<input checked="" type="radio"/> Built-in <input type="radio"/> UDM							
Type				Mode			
GGOV3				Droop			
Sample Data							
R	Rselect	Ldref	Tpelec	Kimw	Pmwset	Kpgov	Kigov
0.04	1	1	2.5	0.002	0	10	1.33
Kdgov	Tdgov	Kpload	Kload	Ka	Ta	Aset	Dm
0	1	2	0.67	10	0.05	0.01	-2
Vmax	Vmin	Ffa	Ffb	Ffc	Ffd	Dnrate	Dnhi
1	0.15	0	1	1	1	0.0002	0.1
Dnlo	Ropen	Rclose	Rup	Rdown	Maxerr	Minerr	Kturb
-0.1	3.3	-3.3	2	-2	0.01	-0.005	1.8
Wfnl	Tact	Tb	Tc	Db	Tsa	Tsb	Tfload
0.18	0.2	0.5	0	0	4	5	3
Tbd	Tcd	Teng	Cp	Cf	Flag	Turbrate	
4	3	0	0	20	1	20	

Type : 505

Generator : New Gen 1, New Gen 2, New Gen 3, New Gen 4 dan New Gen 5

11 kV 34 MW Voltage Control					
<input checked="" type="radio"/> Built-in <input type="radio"/> UDM					
Type		Mode		Priority	
505		Droop		Load	
Sample Data					
Droop 1		I1 <D>		SDR1	RampRate
4		6		5	0.03
P1 <I>	I1 <I>	SDR1 <I>	EFmax	P1 <D>	
3	6	5	162	3	
L1	L2	Ta1	Tm1	TS	
100	-30	1	1	0.015	
Droop2	P2	I2	SDR2	ExtPress	ExtFlow
4	3	6	5	1	1
HPa	HPb	HPc	HPmax	Sa	Sb
84	172	30	172	24865	9600
Sc	Smax	L3	L4	Ta2	Tm2
-400	28000	100	0	1	1

Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage*

Kasus	f (%) min	f (%) steady state	ID BUS	V (%) min	V (%) Steady state	Kondisi	
						f	V
GE-K2 <i>trip</i>	98.6	99.83	00-SG-1	99.34	99.99	√	√
			00-SG-101	98.78	99.97		√
			03-SG-101	98.14	99.95		√
			52-SG-101	98.43	99.98		√
			BUS10	95.2	96.08		√
			KALTIM 1A	95.18	96.62		√
			KDM 11	98.58	99.97		√
			New System 1	97.54	98.36		√
			SG-00-K5	98.09	99.91		√
			SWGR-1	92.82	94.29		√
			TU-SG-02	95.43	96.27		√
New Gen 1 <i>trip</i>	94.17	99.61	00-SG-1	98.9	100	√	√
			00-SG-101	97.99	99.97		√
			03-SG-101	94.69	96.88		√
			52-SG-101	97.33	99.98		√
			BUS10	92.63	94.93		√
			KALTIM 1A	93.64	95.86		√
			KDM 11	97.64	99.97		√

			New System 1	96.88	98.2		√
			SG-00-K5	90.46	92.75		√
			SWGR-1	97.55	99.96		√
			TU-SG-02	94.71	96.05		√
New Gen + GEN P K- 4 trip	99.03	99.87	00-SG-1	97.4	98.44	√	√
			00-SG-101	88.58	90.07		√
			03-SG-101	98.57	99.96		√
			52-SG-101	98.61	99.99		√
			BUS10	96.48	97.53		√
			KALTIM 1A	93.28	94.61		√
			KDM 11	98.74	99.98		√
			New System 1	97.3	98.24		√
			SG-00-K5	98.27	99.93		√
			SWGR-1	98.71	99.98		√
			TU-SG-02	94.08	95.77		√
STG K-5 + STG2 K5 trip	94.34	99.59	00-SG-1	98.71	100	√	√
			00-SG-101	97.55	99.97		√
			03-SG-101	93.83	96.66		√
			52-SG-101	96.76	99.98		√
			BUS10	94.71	96.48		√
			KALTIM 1A	92.77	95.63		√

			KDM 11	97	99.97		√
			New System 1	96.16	97.82		√
			SG-00-K5	90.46	92.75		√
			SWGR-1	96.95	99.96		√
			TU-SG-02	94.08	95.77		√
GE K2 + Alsthom K3 <i>off</i> + New Gen 1 <i>trip</i>	X	X	00-SG-1	87.03	90.45	X	√
			00-SG-101	97.25	99.96		√
			03-SG-101	93.17	96.9		√
			52-SG-101	95.81	99.21		√
			BUS10	92.53	95.88		√
			KALTIM 1A	92.42	95.67		√
			KDM 11	96.47	99.94		√
			New System 1	94.12	97.26		√
			SG-00-K5	95.55	99.57		√
			SWGR-1	95.2	98.68		√
			TU-SG-02	94.57	97.82		√
GE K2 + Alsthom K3 <i>off</i> + New Gen 1 <i>Trip</i> +	95.5	99.54	00-SG-1	87.03	91.16	√	√
			00-SG-101	97.25	99.99		√
			03-SG-101	93.17	97.06		√
			52-SG-101	95.81	105		√
			BUS10	95.77	97.06		√
			KALTIM 1A	92.42	97.99		√

<i>Load Shedding</i>			KDM 11	96.47	99.99		√
			New System 1	94.12	97.91		√
			SG-00-K5	95.55	99.91		√
			SWGR-1	95.2	105.2		√
			TU-SG-02	94.57	98.6		√
GE K2 + New Gen 1 <i>off</i> + New Gen 2 <i>Trip</i>	X	X	00-SG-1	X	X	X	X
			00-SG-101	X	X		X
			03-SG-101	X	X		X
			52-SG-101	X	X		X
			BUS10	X	X		X
			KALTIM 1A	X	X		X
			KDM 11	X	X		X
			New System 1	X	X		X
			SG-00-K5	X	X		X
			SWGR-1	X	X		X
			TU-SG-02	X	X		X
GE K2 + New Gen 1 <i>off</i> + New Gen 2 <i>Trip</i> + <i>Load Shedding</i>	98.27	99.99	00-SG-1	94.49	105	√	√
			00-SG-101	98.81	100		√
			03-SG-101	98.9	99.97		√
			52-SG-101	94.37	96.63		√
			BUS10	97.26	100.8		√
			KALTIM 1A	94.48	99.12		√

			KDM 11	97.22	100.9		√
			New System 1	95.94	100.3		√
			SG-00-K5	97.16	100		√
			SWGR-1	93.09	100.2		√
			TU-SG-02	96.76	101.2		√
New Gen 1 + New Gen 2 off + STG2 K5 trip	X	X	00-SG-201	X	X	X	X
			00-SG-301	X	X		X
			03-SG-102	X	X		X
			52-SG-102	X	X		X
			BUS11	X	X		X
			KALTIM 1A	X	X		X
			KDM 12	X	X		X
			New System 2	X	X		X
			SG-00-K6	X	X		X
			SWGR-2	X	X		X
			TU-SG-03	X	X		X
New Gen 1 + New Gen 2 off + STG2 K5 trip	96.24	99.61	00-SG-1	86.55	101.7	√	√
			00-SG-101	97.82	99.99		√
			03-SG-101	85.56	90.3		√
			52-SG-101	97.22	99.98		√
			BUS10	89.57	97.85		√

+ <i>Load Shedding</i>			KALTIM 1A	93.55	97.73		√
			KDM 11	97.17	99.99		√
			New System 1	91.33	99.11		√
			SG-00-K5	95.99	99.88		√
			SWGR-1	96.85	99.98		√
			TU-SG-02	92.01	99.81		√

Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan *Short Circuit*

Kasus	f (%) min	f (%) steady state	ID BUS	V (%) min	V (%) Steady state	Kondisi	
						f	V
SC 6.6 KV	99.74	100	00-SG-1	96.48	100	√	√
			00-SG-101	92.85	100		√
			03-SG-101	92.11	100		√
			52-SG-101	91.78	100		√
			BUS10	90.21	96.32		√
			KDM 11	91.89	100		√
			New System 1	92.94	98.58		√
			SG-00-K5	89.75	100		√
			SWGR-1	90.96	100		√
			TU-SG-02	90.6	96.55		√
SC 6.9 KV	99.93	100	00-SG-1	97.21	100	√	√
			00-SG-101	94.27	99.99		√
			03-SG-101	93.71	99.97		√

			52-SG-101	63.95	91.82		√
			BUS10	91.43	1002		√
			KALTIM 1A	86.27	96.48		√
			KDM 11	93.51	99.99		√
			New System 1	94.06	99.46		√
			SG-00-K5	91.77	99.92		√
			SWGR-1	92.75	99.99		√
			TU-SG-02	91.78	97.28		√
SC 11 KV	99.55	100.1	00-SG-1	92.23	100	√	√
			00-SG-101	84.33	100		√
			03-SG-101	83.84	100		√
			52-SG-101	82.4	100		√
			BUS10	83	96.29		√
			KALTIM 1A	69.09	97.65		√
			KDM 11	0	100		√
			New System 1	86.35	98.56		√
			SG-00-K5	78.31	100		√
			SWGR-1	80.11	100		√
			TU-SG-02	83.68	96.53		√
SC 20 KV	99.94	100	00-SG-1	84.82	100	√	√
			00-SG-101	95.19	100		√
			03-SG-101	94.78	100		√

			52-SG-101	94.57	100		√
			BUS10	73.67	96.62		√
			KALTIM 1A	73.67	96.62		√
			KDM 11	94.57	100		√
			New System 1	75.14	98.86		√
			SG-00-K5	93.08	100		√
			SWGR-1	93.87	100		√
SC 33 KV	99.63	100	00-SG-1	92.3	100	√	√
			00-SG-101	84.54	100		√
			03-SG-101	83.29	100		√
			52-SG-101	11.31	100		√
			BUS10	83.14	96.3		√
			KALTIM 1A	69.39	97.65		√
			KDM 11	82.53	100		√
			New System 1	86.49	98.56		√
			SG-00-K5	78.17	100		√
			SWGR-1	80.37	100		√
			TU-SG-02	83.79	96.53		√